

罗德与施瓦茨 高校测试大平台建设建议书

咏绎科技



前言:

80多年来，罗德与施瓦茨始终是所有无线通信领域中质量、精准和创新的代名词。罗德与施瓦茨公司在战略上分为五大业务领域：测试与测量、广播电视与媒体、网络安全、安全通信、无线电监测与定位。公司为用户提供移动通信、无线、广播、电子和汽车工业、航空航天和国防，以及政府、安全和关键基础设施方面的解决方案。在所涉足的业务领域，罗德与施瓦茨是全球市场的领导者之一。它是世界一流的无线通信、EMC测试与测量及数字地面电视的广播和测试与测量设备的制造商。

罗德与施瓦茨公司非常重视与中国高校的合作与交流。自2004年开始与中国高校合作，建立了多个联合实验室，每年定期开展互动教学和研究工作，支持和帮助完成了众多教学和科研项目，树立了校企合作的良好形象。为了加强与中国高校的全面发展，支持“双一流”的高校建设方向，进一步促进高校用户之间相互交流和经验分享，充分发挥先进的测试仪器与技术服务与教学和科研的作用，我们结合当前社会发展的热点和R&S公司的行业技术积累，在5G，IoT，射频微波，网联汽车，IC等领域，提出了测试环境和平台搭建的建议书。作为一家秉承技术创新的测试仪器公司，罗德与施瓦茨也希望通过分享这些最新的技术和方案，共同促进教学和科研的创新与发展，为教育事业贡献自己的力量。

借此机会，也感谢全国高校领域的老师们长期以来对罗德与施瓦茨公司的信任与支持，罗德与施瓦茨会一如既往地为广大老师们提供最先进的测试技术与仪器，满足老师们在科研和教学中的测试需求，共同发展，携手走向未来。

目 录

5G 测试大平台

| | |
|--------------------------------|----|
| 自定义OFDM信号产生和分析平台 | 5 |
| 3GPP标准的5G NR信号产生和分析平台 | 7 |
| 无线信道测试平台 | 9 |
| 5G Channel Sounding 测试平台 | 13 |
| 5G元器件测试平台 | 16 |
| 有源天线系统的OTA测试平台 | 27 |
| 5G终端测试平台 | 29 |
| 5G网络覆盖测试平台 | 32 |

物联网综合测试大平台

| | |
|-------------------------------------|----|
| WLAN 综合测试平台 | 33 |
| Blue Tooth BR/EDR/LTE/5.0测试平台 | 41 |
| NB IoT和eMTC测试平台 | 43 |
| LORA测试平台 | 49 |
| 802.15.4 (含Zigbee) 测试平台 | 53 |

射频微波测试大平台

| | |
|-----------------------|-----|
| 最新通用射频微波元器件测试平台 | 56 |
| 毫米波太赫兹测试平台 | 67 |
| 射频在片测试平台 | 72 |
| 负载牵引测试平台 | 75 |
| 非线性测试平台 | 79 |
| 多端口收发组件测试平台 | 82 |
| 全球卫星导航设备测试平台 | 89 |
| 材料电磁特性参数测试平台 | 102 |

IC测试大平台

| | |
|----------------------|-----|
| 通用射频微波芯片测试平台 | 109 |
| 射频微波芯片高端拓展测试平台 | 118 |
| 无线和IoT芯片扩展测试平台 | 122 |

智能网联汽车测试大平台

| | |
|-----------------|-----|
| 车联网测试平台 | 131 |
| 车载雷达测试平台 | 155 |
| BMS系统测试平台 | 160 |

视频生成与分析大平台

| | |
|-------------------|-----|
| 屏幕显示质量测试平台 | 169 |
| HDMI接口测试平台 | 170 |
| 模拟音视频接口测试平台 | 172 |
| 音视频失真分析测试平台 | 173 |
| 车载影音娱乐测试平台 | 174 |

5G测试大平台

5G概述

随着移动通信系统带宽和能力的增加，面向个人和行业的移动应用快速发展。移动互联网和物联网的快速发展，成为5G的主要驱动力。面向2020年及未来，超高清、3D和沉浸式视频的流行，将会驱动数据速率大幅提升，同时用户还能够在体育场、演唱会等超密集场所，高铁、车载、地铁等高速移动环境下也能够获得一致的业务体验；物联网的广泛应用，智能家居、智能电网、视频监控、移动医疗、车联网等应用对移动通信技术提出了更严格的低延时、高可靠性、大容量等需求。在新一代移动通信网络中，能耗、每比特成本、部署和维护的复杂度等可持续发展要求也进一步加强。

目前从5G标准化进程来看，3GPP第一个5G版本Rel.15已经于2017年12月份正式冻结，也就是NSA(非独立组网)核心标准已经冻结，并于2018年6月完成SA(独立组网)规范，5G关键技术主要包括以下四个方面：

毫米波

所谓毫米波，即波长范围10到1毫米之间，也就是频率在30 GHz到300 GHz之间的无线电波。传统的移动通信工作频段主要集中在3 GHz以下，使得频谱资源已经十分拥挤，而在高频段可用频谱资源丰富，能够有效缓解频谱资源紧张的现状，同时也可以实现高速短距离通信，支持5G容量和传输速率等方面的需求。不过毫米波频段传输存在着传输距离短、穿透力和绕射能力差、容易受气候环境影响等缺点，如果真正想要在毫米波频段实现5G的各种业务，还有待进一步研究和解决这些问题。

大规模MIMO技术

MIMO技术已经广泛应用于LTE，WLAN等技术上面，理论上，天线越多，频谱效率和传输可靠性就越高。作为近年来备受关注的技术之一，多天线技术经历了从无源到有源，从二维到三维(3D)，从高阶MIMO到大规模天线阵列的发展，将有望实现频谱效率提升至十倍甚至更高，是目前5G技术重要的研究方向之一。

高带宽传输

根据香农定律可知，信道容量与带宽和信噪比成正比，为了满足5G网络Gbps级的数据速率，需要更大的带宽。频率越高，带宽就越大，信道容量也就越高，因此，高频段连续带宽将成为5G的主流选择。配合一些有效的提升频谱效率技术，比如大规模MIMO等，在高带宽模式下可以很容易实现10 Gbps的传输速率。

新型空中接口技术

为了进一步的提高频谱利用率以及应用的灵活性，3GPP Release 15定义了新型的5G NR空口技术规范，新的空口技术规范包括新型编码技术和新型参数集和帧结构。新型编码技术，目前3GPP会议确定在增强移动宽带场景(eMBB)中的数据信道使用LDPC编码技术，控制信道使用Polar编码技术；提到新型参数集和帧结构，为了应对不同频段和场景，在5G系统中规定以15 KHz为基础子载波间隔，可以将子载波间隔配置为 15×2^n KHz。同时，系统还需要支持灵活的帧结构设计，帧结构灵活配置，以支持上下行业务速率不同需求的场景。

罗德与施瓦茨公司提供了5G几乎所有相关的测试解决方案，如下图所示，包括了宽带和毫米波矢量信号产生和分析、空中信道衰落特性测试、毫米波元器件测试、5G NR信号产生和分析、Massive MIMO传导和OTA测试、以及基站和终端测试等各个方向。



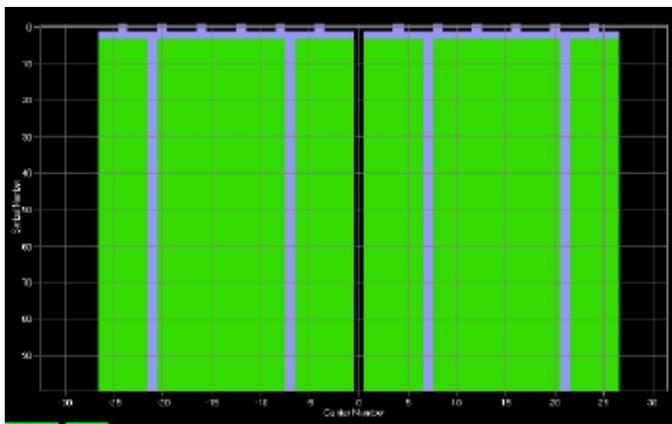
一 自定义OFDM信号产生和分析平台

在5G NR标准未冻结之前，基站和终端芯片厂商都在研究自定义的5G新波形和多址方案，由于这一类的研究活动保密性较强，很少有公开文档来描述信号详细特征，并且过程中参数随时可能变化，具有很大的不确定性。这就要求信号源和频谱仪能够支持自定义的OFDM信号产生和分析，并且能够灵活地适配各种OFDM参数设置。

自定义OFDM信号分析软件 (VSE-K96) 支持客户自定义子载波间隔、循环前缀长度、帧结构、参数集、调制方式等，按照被测信号形式生成配置文件，对被测信号进行解调和分析。



VSE-K96软件中可以在以时频域为基础，显示被测信号在时频域的资源分布，占用的子载波和时域符号，并且以不同颜色区分不同信号类型，帧结构解析示意图如下：

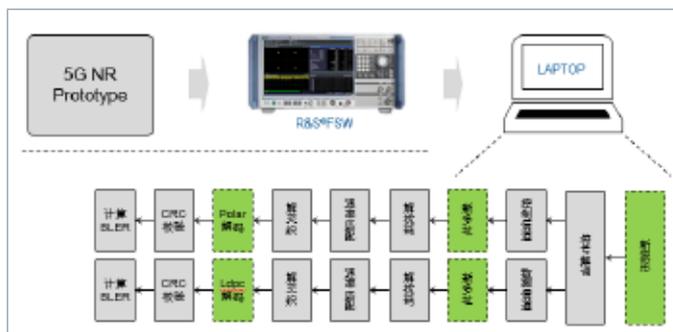


帧结构解析示意图



自定义OFDM信号产生选项

同时针对5G系统采用的新型多址接入技术和新型编码技术，基于R&S公司的后处理软件也可以在解调分析的基础上进一步进行解码功能测试，示意图如下：



新型编码测试平台

订购信息

| 信号源SMW200A | | |
|---|---------------|------------------------------|
| 描述 | 选件名 | 货号 |
| Wideband Baseband Generator with ARB (256 Msample), 500 MHz RF bandwidth | B9 | 1413.7350.02 |
| Wideband Baseband Main Module, two I/Q paths to RF 100 kHz to 6 GHz | B13XT B106 | 1413.8005.02 1413.0104.02 |
| 100 kHz to 12.75 GHz | B112 | 1413.0204.03 |
| 100 kHz to 20 GHz | B120 | 1413.0404.02 |
| 100 kHz to 31.8 GHz | B131 | 1413.8605.02 |
| 100 kHz to 40 GHz | B140 | 1413.0604.02 |
| Enhanced Phase Noise Performance and FM/φM Modulator | SMW-B22 | 1413.2207.02 |
| Baseband Extension to 1 GHz RF bandwidth | SMW-K525 | 1414.6129.02 |
| Baseband Extension to 2 GHz RF bandwidth | SMW-K527 | 1414.6158.02 |
| OFDM Signal Generation | SMW-K114 | 1414.1985.02 |

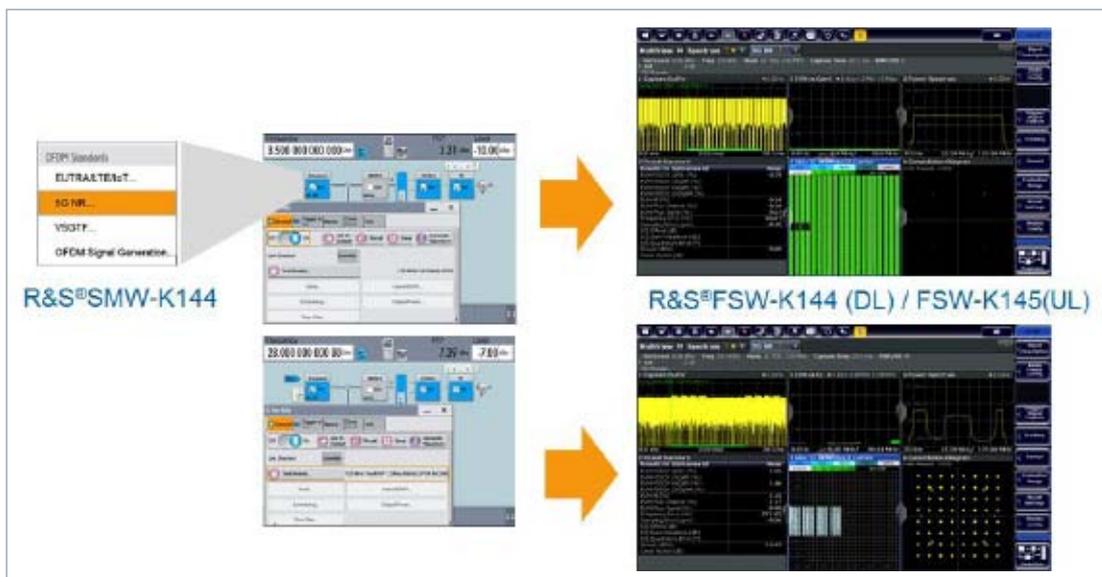
| 频谱仪FSW, 2 Hz ~ 8/13.6/26.5/43.5/50/67/85/90 GHz | | |
|---|-----------|--------------|
| 描述 | 选件名 | 货号 |
| OCXO Precision Frequency Reference | FSW-B4 | 1313.0703.02 |
| RF Preamplifier | B24 | |
| 160 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B160 | 1325.4850.04 |
| 320 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B320 | 1325.4867.04 |
| 512 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B512 | 1331.7106.04 |
| 1200 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B1200 | 1331.6400.04 |
| 2000 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B2001 | 1331.6916.04 |
| License Dongle | FSPC | 1310.0002.03 |
| R&S®VSE Basic Edition (requires R&S®FSPC) | VSE | 1345.1011.06 |
| OFDM Signal AnalysisVSE-K96 | VSE-K96 | 1320.7922.06 |

二 3GPP标准的5G NR信号产生和分析平台

3GPP NSA的L1/L2规范已于2017年底正式冻结，罗德与施瓦茨公司随之于2018年初提供完全符合3GPP标准的信号产生和解调选件SMW-K144和FSW-K144/K145，支持Sub6G和毫米波，支持协议中定义的各种带宽和参数集配置，满足5G NR发射机和接收机测试，以及像功放和终端RFIC研发测试需求。



SMW的5G NR选件SMW-K144提供了实时信号生成能力，无需通过电脑事先生成波形文件导入信号源，所有设置操作都可在带触摸屏的SMW上完成，另外频谱仪FSW的5G NR解调软件K144/K145其界面风格和4G LTE相近，给5G研发工作带来了极大的方便性。



订购信息

| 信号源SMW200A | | |
|--|----------|--------------|
| 描述 | 选件名 | 货号 |
| Wideband Baseband Generator with ARB (256 Msample), 500 MHz RF bandwidth | B9 | 1413.7350.02 |
| Wideband Baseband Main Module, two I/Q paths to RF | B13XT | 1413.8005.02 |
| 100 kHz to 6 GHz | B106 | 1413.0104.02 |
| 100 kHz to 12.75 GHz | B112 | 1413.0204.03 |
| 100 kHz to 20 GHz | B120 | 1413.0404.02 |
| 100 kHz to 31.8 GHz | B131 | 1413.8605.02 |
| 100 kHz to 40 GHz | B140 | 1413.0604.02 |
| Enhanced Phase Noise Performance and FM/φ M Modulator | SMW-B22 | 1413.2207.02 |
| Baseband Extension to 1 GHz RF bandwidth | SMW-K525 | 1414.6129.02 |
| Baseband Extension to 2 GHz RF bandwidth | SMW-K527 | 1414.6158.02 |
| ARB Memory Extension to 2 Gsample | SMW-K515 | 1413.9360.02 |
| 5G New Radio | SMW-K144 | 1414.4990.02 |

| 频谱仪FSW, 2 Hz ~ 8/13.6/26.5/43.5/50/67/85/90 GHz | | |
|---|-----------|--------------|
| 描述 | 选件名 | 货号 |
| OCXO Precision Frequency Reference | FSW-B4 | 1313.0703.02 |
| RF Preamplifier | B24 | |
| 160 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B160 | 1325.4850.04 |
| 320 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B320 | 1325.4867.04 |
| 512 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B512 | 1331.7106.04 |
| 1200 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B1200 | 1331.6400.04 |
| 2000 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B2001 | 1331.6916.04 |
| Amplifier Measurements Application | FSW-K18 | 1325.2170.02 |
| Direct DPD Measurements | FSW-K18D | 1331.6845.02 |
| 3GPP 5G-NR DL Measurements | FSW-K144 | 1338.3606.02 |
| 3GPP 5G-NR UL Measurements | FSW-K145 | |

三 无线信道测试平台

由于超高清、3D和侵入式视频的流行，智能家居、视频监控等应用的大规模发展，在第五代移动通信系统中将会对数据速率，时延和可靠性提出更高的要求。因此5G系统将会考虑使用毫米波频段（15 GHz，28 GHz等），同时为了实现更高的传输速率，还需要使用更大的传输带宽，比如1 GHz或者更高。

传统的移动通信频段都是在6 GHz以下，在这个频段积累了大量的信道模型研究结果。但是对于毫米波频段的信道传播特性却知之甚少，因此对毫米波频段的信道进行评估和探测是5G技术研究的关键，尤其是在大带宽和多天线情况下，对信道测量的方法提出了更新的要求。

本文将简要介绍信道特征基础，不同的信道测量方法，以及罗德与施瓦茨公司针对毫米波频段信道测量，提供的灵活、可升级的解决方案。

无线信道特性

无线信号从发射天线到接收天线的传输过程中，会经历各种复杂的传播路径，包括直射路径、反射路径、衍射路径、散射路径以及这些路径的随机结合。同时，电波在各种路径的传播过程中，有用信号会受到各种噪声的污染，因而会出现不同情形的损伤，严重时会使信号难以恢复。无线信号在传播时，不仅存在自由空间固有的传输损耗，还会受到建筑物、地形等的阻挡而引起信号功率的衰减和相位的失真，这种衰减还会由于移动台的运动和信道环境的改变出现随机的变化。下面将讨论无线传输信道的主要特性。

多径信道

在通信系统中，由于通信地面站天线波束较宽，受地物、地貌和海况等诸多因素的影响，使接收机收到经折射、反射和直射等几条路径到达的电磁波，这种现象就是多径效应。

这些不同路径到达的电磁波射线相位不一致且具有时变性，导致接收信号呈衰落状态；这些电磁波射线到达的时延不同，又导致码间干扰。若多射线强度较大，且时延差不能忽略，则会产生误码，这种误码靠增加发射功率是不能消除的，而由此多径效应产生的衰落叫多径衰落，它也是产生码间干扰的根源。多径效应是除了传播衰减之外在无线信道测量中最重要的特征参数。

时变定向信道

事实上，无线信道是非静态的，是随着时间而变化的，对于评估波束赋形系统来讲，定向时变信息就显得更为重要。加

上定向信息之后，无线信道冲击响应可用 $h(t, \tau, \varphi)$ 公式表示，其中 t 为时间， τ 为时延， φ 为方位角。定向时变信道通过傅里叶变换可以由下图中的八个系统函数所表示：

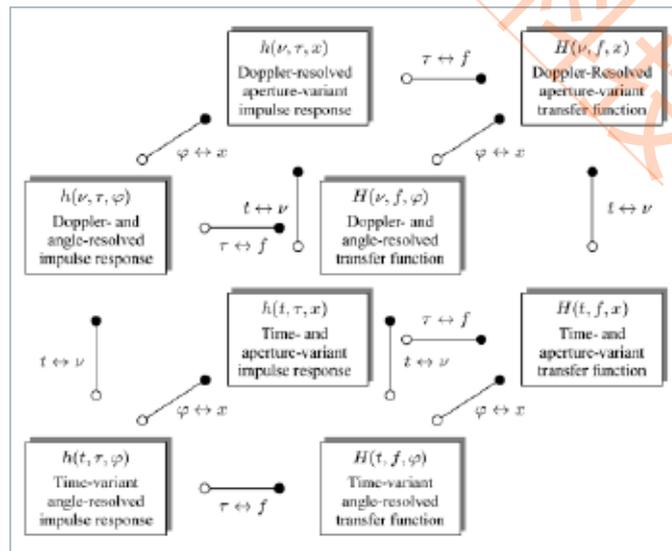


图1 信道系统函数

信道测量技术

信道测量的基本方法就是在无线信号特定传播场景中抓取其中的一个系统函数，用来表示信道。需要观察的系统函数不同，决定了不同的信道测量方法，常见的信道测量技术分为频域信道测量和时域信道测量两种。同时，由于在5G系统中，大规模天线阵列和波束赋形技术的使用，角度信息也成为信道测量中重要的参数，下面将分别从频域、时域、角度三个方面介绍信道测量技术。

频域信道测量

频域信道测量通常使用矢量网络分析仪来完成，它可以测量出信道的频率响应参数，通过反傅里叶变化可以得到信道的冲击响应。其基本原理如下图所示：其中 $X(f)$ 为发射信号的频谱， $Y(f)$ 为接收信号的频谱。矢量网络分析仪可以测量出各个频点的传输增益，从而得到信道的频率响应 $H(f)$ 。

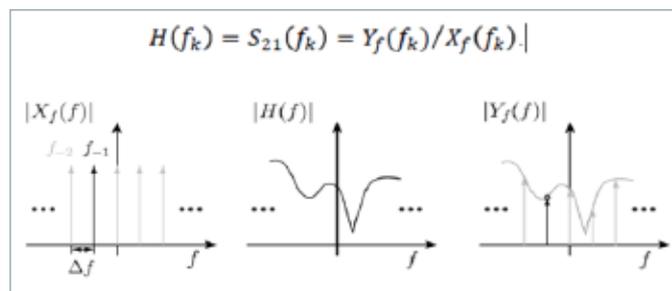


图2 频域信道测量函数

罗德与施瓦茨公司的矢量网络分析仪ZVA，可以提供从300 KHz到110 GHz频段的测试，为5G毫米波频段的信道测量提供完整的测试方案，其示意图如下：



图3 ZVA毫米波频段测试示意图

频域方法的优点是可以测试各种频段完整的信道响应特性，不受信道带宽的限制。但是也存在着只能测试时不变多径信道，以及外场测试受限于收发同台仪表等缺点。

时域信道测量

时域信道测量是信道冲击响应直接测量的方法，通常使用伪随机序列作为信道探测的信号，在接收端用已知的序列做相关可以得到信道冲击响应。这种测量方法需要系统硬件能够产生和分析宽带的探测信号，才可以完成。理论测试框图如下所示：

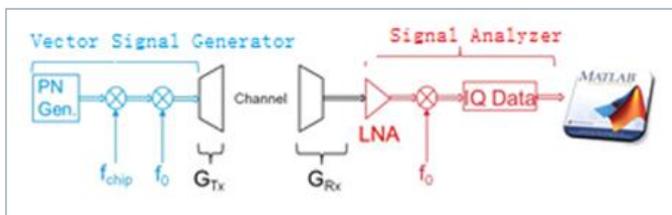


图4 时域信道测量框图

罗德与施瓦茨公司针对时域信道测量方案发射端可以提供矢量信号发生器SMW200A，其最大可实现2 GHz带宽信号的产生。同时，该信号发生器单台仪表可以产生40 GHz的频率的信号，如果配合响应外部混频模块，可以产生100 GHz频率的信号。在接收端，R&S公司的矢量信号分析仪FSW最高频率可达到85 GHz，同样配合混频模块可以实现高达100 GHz信号的接收和分析，FSW自身的分析带宽最大为2 GHz，配合RTO可以实现5 GHz带宽信号的分析。下图为R&S公司针对信道探测的基本测试环境，如果在发射端和接收端分别配置天线，即可实现外场测试：

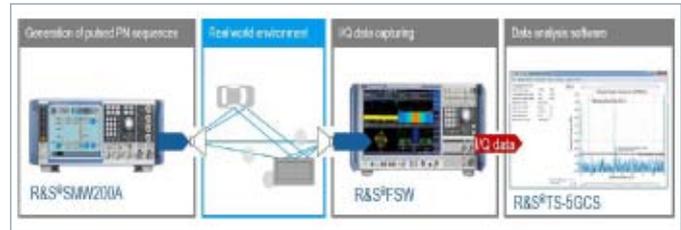


图5 R&S信道测量方案

如果在发射端和接收端配合相应的同步触发设备，还可以测试出信道的绝对时延，R&S公司的TSMX-PP2设备是一台GPS接收机，同时可以提供相应的PP1信号作为信号源和频谱仪的触发信号，可以实现无线信道的绝对时延测试，实际测试示意图如下：

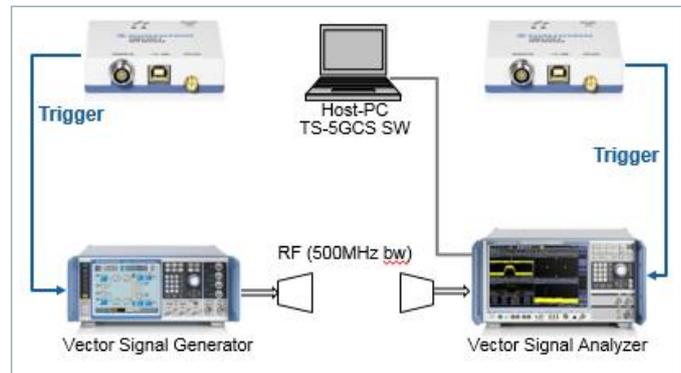


图6 绝对时延信道测量方案

多天线扩展

在5G系统中，大规模天线阵列以及波束赋性等技术的使用，对多天线信道测量以及信道测量中的角度信息等参数也提出了要求。罗德与施瓦茨公司根据时域测量方法，基于定制化的可编程控制转台，构建了全自动化的无线信道测量系统，可实现在俯仰角和方位角平面的全向扫描，从而实现天线波束的空间全向覆盖。本系统实际使用的主要仪器设备包括有：矢量信号分析仪FSW、信号发生器SMW、多维度测量转台、铷钟、高增益喇叭天线等。系统框图如下：

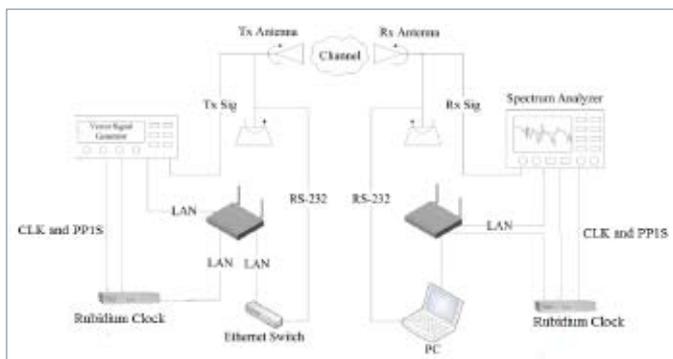


图7 自动化信道测量方案

使用自动化测量系统能够在空间进行方位角和俯仰角360°全向角度扫描，考虑到高频段电波存在较大的路径损耗，于是在高频段无线信道测量方案设计时系统采用了高增益的窄波束喇叭天线通过在方位角和俯仰角平面进行角度扫描来模拟宽波束的收发天线，如图8所示。

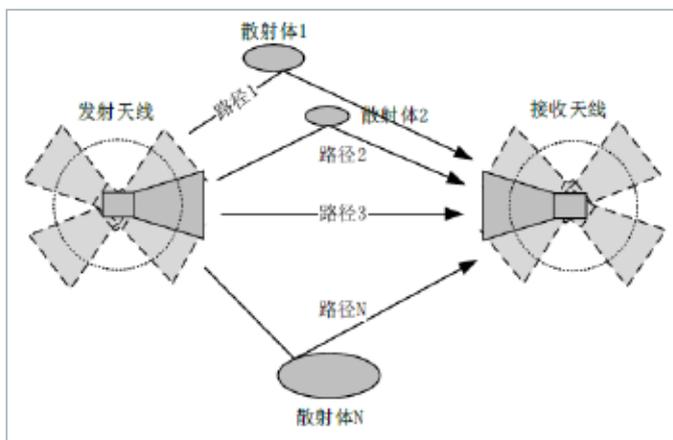


图8 通过角度扫描模拟宽波束天线示意图

通过这种角度扫描的方案不仅可以用来将窄波束天线模拟成较宽波束的天线，更可通过较细致的角度扫描工作来更加准确的确定无线电波的离开角 (Angle of Departure, AOD) 和到达角 (Angle of Arrival, AOA)，如图9所示。

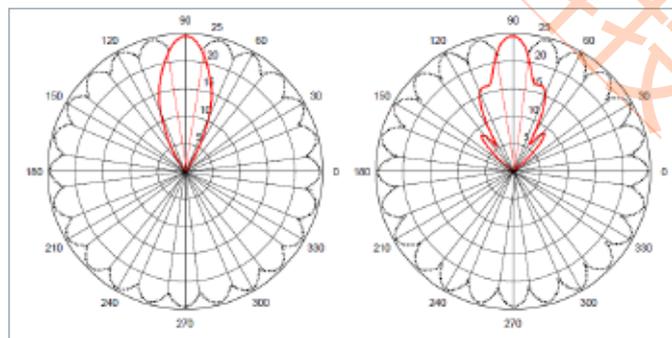


图9 采用角度扫描合成的等效全向辐射方向图(E、H面)

在此系统测量方案中，使用了可在俯仰角和方位角平面进行扫描的，于是在数据分析阶段，对同一位置、不同角度的接收信号采取复数叠加的处理方式，某一特定位置的接收信号 S_r 计算如下：

$$S_r = \sum_{k,l,m,n} a_{klmn} e^{j \cdot \varphi_{klmn}}$$

其中， a_{klmn} 表示发射天线处于第 k 个俯仰角和第 l 个方位角、接收天线处于第 m 个俯仰角和第 n 个方位角时接收信号幅值； φ_{klmn} 表示发射天线处于第 k 个俯仰角和第 l 个方位角、接收天线处于第 m 个俯仰角和第 n 个方位角时接收信号相位。采用复数叠加的方法可将不同角度的接收信号有效的合成，继而得到精确地功率角度分布谱，后续的实际测量及数据分析结果表明此方法是有效可行的。

小结

本文简要无线信道的基本特性以及测量的基本方法，同时介绍了R&S公司针对5G信道测量的解决方案。罗德与施瓦茨公司的矢量信号发生器SMW200A，矢量信号分析仪FSW，以及相应软件组成的信道测量方案可以提供高灵敏度、大带宽、毫米波频段的信道测量，同时该方案还可以灵活扩展至多天线信道测量应用，为5G技术的研究提供有力的支持。

订购信息

| 信号源SMW200A | | |
|---|-----------|--------------|
| 描述 | 选件名 | 货号 |
| Wideband Baseband Generator with ARB (256 Msample), 500 MHz RF bandwidth | SMW-B9 | 1413.7350.02 |
| Wideband Baseband Main Module, two I/Q paths to RF | SMW-B13XT | 1413.8005.02 |
| 100 kHz to 6 GHz | SMW-B106 | 1413.0104.02 |
| 100 kHz to 12.75 GHz | SMW-B112 | 1413.0204.03 |
| 100 kHz to 20 GHz | SMW-B120 | 1413.0404.02 |
| 100 kHz to 31.8 GHz | SMW-B131 | 1413.8605.02 |
| 100 kHz to 40 GHz | SMW-B140 | 1413.0604.02 |
| Enhanced Phase Noise Performance and FM/φM Modulator | SMW-B22 | 1413.2207.02 |
| Baseband Extension to 1 GHz RF bandwidth | SMW-K525 | 1414.6129.02 |
| Baseband Extension to 2 GHz RF bandwidth | SMW-K527 | 1414.6158.02 |
| ARB Memory Extension to 2 Gsample | SMW-K515 | 1413.9360.02 |

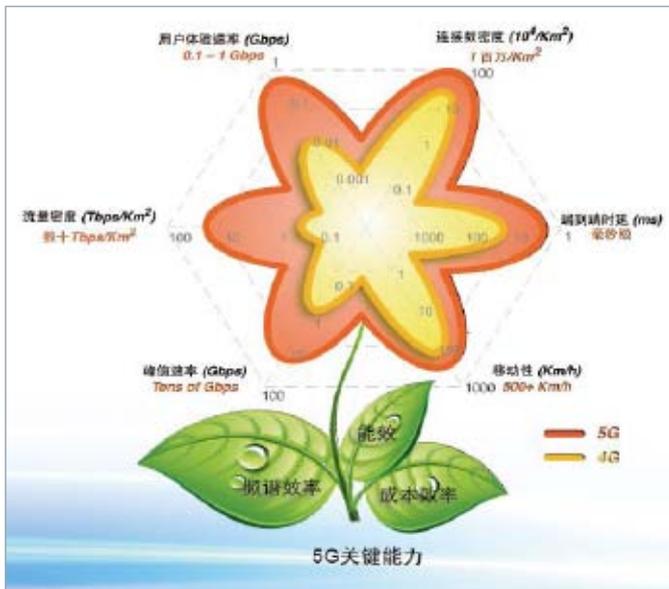
| 频谱仪FSW, 2 Hz ~ 8/13.6/26.5/43.5/50/67/85/90 GHz | | |
|---|-----------|--------------|
| 描述 | 选件名 | 货号 |
| OCXO Precision Frequency Reference | FSW-B4 | 1313.0703.02 |
| RF Preamplifier | B24 | |
| 160 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B160 | 1325.4850.04 |
| 320 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B320 | 1325.4867.04 |
| 512 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B512 | 1331.7106.04 |
| 1200 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B1200 | 1331.6400.04 |
| 2000 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B2001 | 1331.6916.04 |

| TS-5GCS 5G信道测量软件 | | |
|------------------------------------|-----------|--------------|
| 描述 | 选件名 | 货号 |
| TS-5GCS CHANNEL S. SOFTWARE | TS-5GCS | 1529.0000.02 |
| TS-5GCS-M MEAS. OPTION FOR TS-5GCS | TS-5GCS-M | 1529.0016.02 |

四 5G Channel Sounding测试平台

什么是5G

随着移动通信系统带宽和能力的增加，面向个人和行业的移动应用快速发展。移动互联网和物联网的快速发展，成为5G的主要驱动力。中国IMT-2020 (5G) 推进组对5G网络的性能要求和效率需求通过一株绽放的鲜花来进行定义，其中花瓣代表5G的六大性能指标，体现了5G满足未来多样化业务与场景需求的能力，花瓣顶点代表了相应指标的最大值；绿叶代表效率指标，是5G可持续发展的基本保障。



5G性能和效率需求

可见5G系统同之前的通信系统相比，从传输速率，网络容量，稳定性，移动性等都有了很大的提高，同时对成本和能效等指标也提出了新的需求。

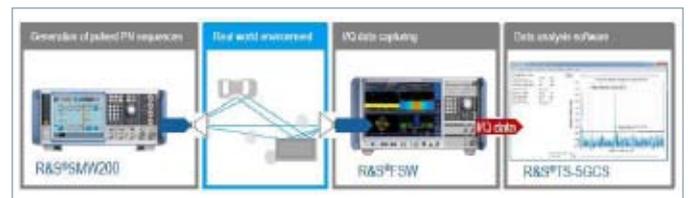
R&S公司Channel sounding方案原理

传统的民用移动通信频段都集中在6 GHz以下，但是对于5G系统，毫米波已经是业内认可的一项关键技术，也就是说5G系统的频段很有可能在6 GHz到100 GHz 或者更高的频率。但是对于毫米波频段的信道特性（比如路径损耗，时间选择性衰落，遮挡和反射的影响等等）了解甚少，所以为了更好的选择适合5G系统的频段，研究机构需要对毫米波频段的信道特性进行深入的研究，同时由于5G系统会是高带宽系统，宽带信道特性也是研究的重要方向。

常见的信道探测方法主要由如下两种：（一）使用矢量网络分析仪进行探测，该方法的优点是可以测试各种频段完整的信道响应特性，但是也存在着只能测试时不变多径信道，以及

外场测试受限于收发同仪表等缺点；（二）直接信道冲击响应方法测量，该方法主要是通过PN序列相关来进行信道探测，但是传统的发射设备由于硬件的原因受限于带宽，很难产生高带宽的PN序列。

R&S公司提出的信道探测解决方案也是使用PN序列相关方法来进行，但是由于R&S公司的矢量信号发生器SMW200A最大可实现2 GHz带宽信号的产生，所以可以从根本上克服以前直接信道冲击响应方法带宽受限的缺点。同时，该信号发生器单台仪表可以产生40 GHz的频率的信号，如果配合响应外部混频模块，可以产生100 GHz频率的信号。在接收端，R&S公司的矢量信号分析仪FSW最高频率可达到85 GHz，同样配合混频模块可以实现高达100 GHz信号的接收和分析，FSW自身的分析带宽为1.2 GHz，配合RTO可以实现2 GHz带宽信号的分析。下图为R&S公司针对Channel Sounding的基本测试环境，如果在发射端和接收端分别配置天线，即可实现外场测试：



Channel Sounding测试方案

R&S公司Channel sounding方案优势

在Channel Sounding测试过程中，通常存在最关键的两个问题来限制测试的有效性：（一）测试系统的灵敏度，该指标决定着可以外场探测信道的距离；（二）发射端和接收端设备的同步，该项决定了测试系统使用的方便性和可行性。R&S公司的Channel Sounding方案很好的解决了这两个问题，可以轻松地完成5G系统Channel Sounding测试，分别介绍如下：

系统灵敏度

Channel Sounding系统的灵敏度由两部分组成，一是发射端的最大输出功率，另一个是接收端的最小灵敏度。R&S公司的矢量信号发生器SMW200A最大可以产生17 dBm的信号（手册指标，可以标量）。接下来，我们计算接收机FSW的灵敏度，以热噪声为-174 dBm/Hz计算，当信号带宽有100 MHz时，相关PN序列的增益为80 dB，同时FSW接收机的噪声系数典型值为10 dB，也就是说FSW接收机的极限灵敏度为-84 dBm。那么在Channel Sounding系统中，发射端和接收端都会配置天线，以两个天线的增益为30 dB举例，同时加上FSW本身预放增益30 dB，可见整个系统的接收灵敏度为-144 dBm，如果在除掉两根10 m线缆的损耗，那么

系统的灵敏度也有-124 dBm/100 MHz。由此我们可以推算出R&S Channel Sounding系统，在100 MHz带宽情况下，可以测量信道的衰减为17 dBm- (-124 dBm) = 141 dB。根据自由空间衰减公式，当信号频率为60 GHz时，距离1000 m，信号的衰减大致为128 dB，所以R&S公司的方案灵敏度完全可以满足客户的需求。

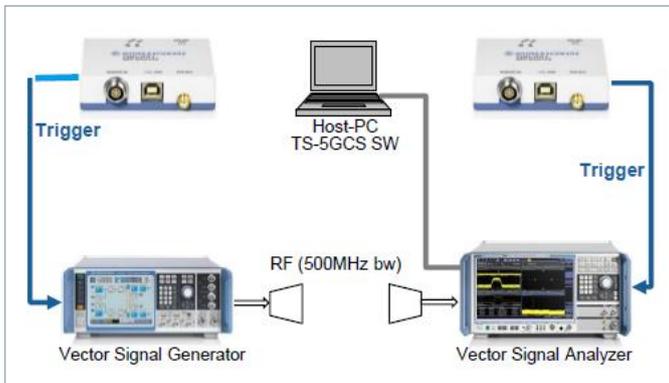
系统同步

由于Channel Sounding系统的发射机和接收机是位于不同位置的两台仪表，所以很多厂家的方案是需要两台仪表进行频率同步的，这样可以提高测试的精度，但是同时会带来测试的复杂性和难实施，很多外场环境下，是无法实现两台仪表同步的。R&S公司的方案不需要发射机和接收机的频率同步，可以在很大程度上提高系统的使用灵活性。具体分析如下，Channel Sounding系统的频率误差由发射机和接收机两部分组成，两者相差不多，我们可以认为系统的频率误差约为2倍的 Δf ，如下表所示不同频率误差在不同的载波频率所带来的误差分别为：

| Reference clock error | 2 GHz | 17 GHz | 28 GHz | 38 GHz | 67 GHz |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 10^{-7} | 400 Hz | 3400 Hz | 5600 Hz | 7600 Hz | 13400 Hz |
| 10^{-9} | 4 Hz | 34 Hz | 56 Hz | 76 Hz | 134 Hz |
| 10^{-12} | 0.004 Hz | 0.034 Hz | 0.056 Hz | 0.076 Hz | 0.134 Hz |

R&S公司的SMW和FSW参考时钟误差可以达到 10^{-9} ，所以当测试频率为67 GHz时，系统的频率误差约为 $2*134 \text{ Hz} = 268 \text{ Hz}$ ，以测试100 MHz带宽信号为例，在接收端的采样率至少为200 MHz (大于2倍带宽)，那么268 Hz的频率偏移，相对于200 MHz的采样率，才会带来 $1.34*10^{-6}$ 的影响，不会影响测试结果精度。

如果系统需要测试绝对时延，可以外接触发信号：



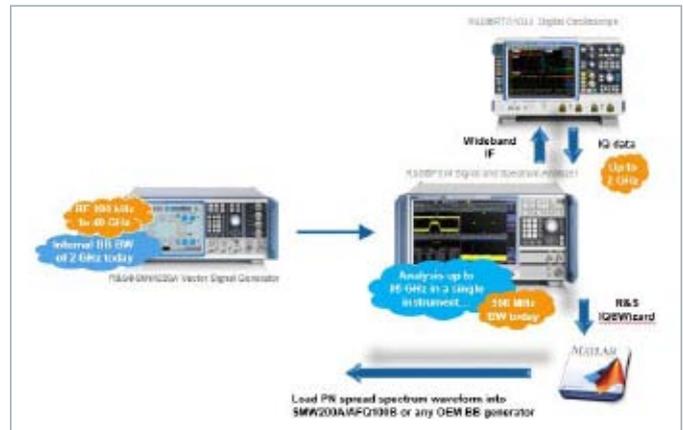
绝对时延测试

Channel Sounding系统组成

R&S公司Channel Sounding系统主要由矢量信号产生系统，矢量信号分析系统和控制软件三部分组成，针对不同频段的信道探测所需的仪表配置有所不同，下面分频段介绍R&S Channel Sounding 系统组成。

40 GHz (含40 GHz) 频段以下

40 GHz以下频段的Channel Sounding系统主要由R&S矢量信号发生器SMW200A (100 KHz~40 GHz)、矢量信号分析仪FSW43 (2 Hz~43.5 GHz) 以及Channel Sounding测试控制软件组成。SMW200A本机的信号带宽为2 GHz，FSW本机的分析带宽为1.2 GHz，配合外部RTO可以实现2 GHz信号分析，结构示意图如下：



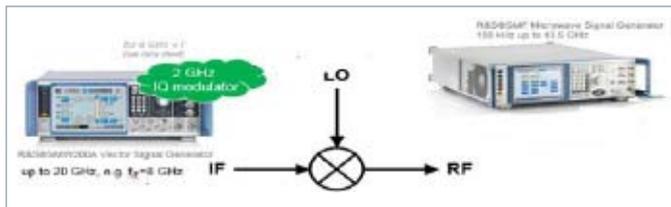
40 GHz以下Channel Sounding系统组成

该系统通过SMW200A发射伪随机序列，长度客户可以自定义，带宽最大为2 GHz，AD精度为16 bit，最大发射功率为18 dBm，接收机灵敏度可达到-124 dBm/100 MHz (具体见第四章描述)。发射机和接收机之间不需要时钟同步。

R&S提供全自动测试软件完成相应的操作，系统全部采用自动方式，用户只需简单设置，点击运行即可，增加用户的工作效率，减轻用户的工作量。同时，系统软件可以提供图形化显示。全自动测试软件还具有记录基本信息、历史记录和自动生成报告等功能。目前R&S Channel Sounding测试软件只能分析静态衰落信道各个径的时延和衰减。

40 GHz ~85 GHz

由于SMW200A最高频率为40 GHz，如果要产生45 GHz的信号进行Channel Sounding，那么需要外接混频器使SMW200A产生高于40 GHz信号。同时，FSW85单台仪表即可实现85 GHz以下信号的分析。所以相比40 GHz系统，唯一差别就是在信号产生端加入一个混频设备即可。示意图如下：



40 GHz~85 GHz信号产生

订购信息

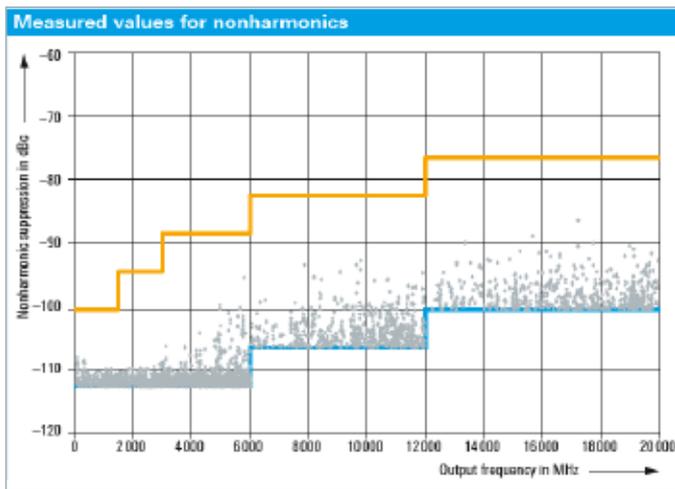
| 名称 | 型号 | 频率范围 | 备注 |
|--|--------------|----------------|-------|
| 矢量信号发生器 | | | |
| 矢量信号发生器 (加R&S®SMW-B140) | R&S®SMW200A | 100 KHz至40 GHz | 含必备选件 |
| 微波信号发生器 | | | |
| 微波信号发生器 (加R&S®SMF-B144选件) | R&S®SMF100A | 1 GHz至43.5 GHz | 含必备选件 |
| 信号与频谱分析仪 | | | |
| 信号与频谱分析仪, 2 Hz 至 85 GHz | R&S®FSW85 | 2 Hz至85 GHz | 含必备选件 |
| 数字示波器 | | | |
| 数字示波器, 2 GHz, 10 G样本/s, 20/80 M样本, 4通道 | R&S®RTO-1024 | | 含必备选件 |
| mm-wave测试附件 | | | 自行采购 |
| 宽频带天线组 | | | 自行采购 |
| 2G基带源 | | | 自行采购 |
| Channel Sounding信号分析软件 | | | 自行采购 |
| 系统控制软件 | | | 自行采购 |

五 5G元器件测试平台

高速高带宽ADC和DAC性能指标测试

5G在Sub 6G和毫米波两个频段单载波最大带宽分别是100 MHz和400 MHz，通过载波聚合后信号总带宽可达200 MHz或1 GHz，并且上下行同时定义了最大256 QAM高阶调制方式，这对特别是基站AAU内的ADC/DAC的有效带宽/SFDR/SNR/ENOB等指标提出了严格的要求，为了能够测试此类转换器的性能，时钟及测试信号源的指标必须超出被测设备的无杂散动态范围。

纯净的时钟信号可以为DAC的模拟输出信号提供最佳的频谱纯度。新款R&S®SMA100B在1 GHz载波频率下非谐波小于100 dBc，相比于前代产品，其噪声级别提高10 dB到18 dB。

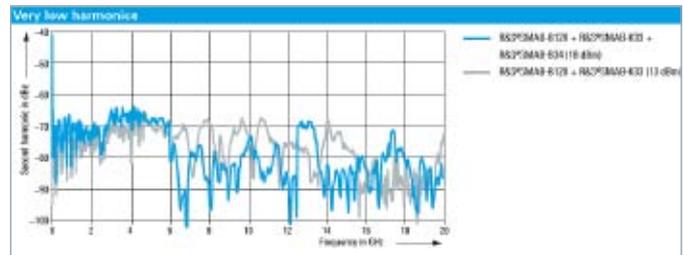


测试ADC通常需要两个信号源：一个是被测设备的采样时钟，另一个是模拟信号。SMA100B除了主射频频率外，另外提供了一个具有超低相位噪声以及宽带噪声（最高6 GHz）的高性能时钟合成器选件，并且时钟的频率可与主射频频率分开设置。通过共享的内部1 GHz参考信号，可实现输出时钟信号与主频率合成器信号之间的极高相位稳定性，支持单端以及差分时钟接口，波形、电平及DC偏置均可编程。

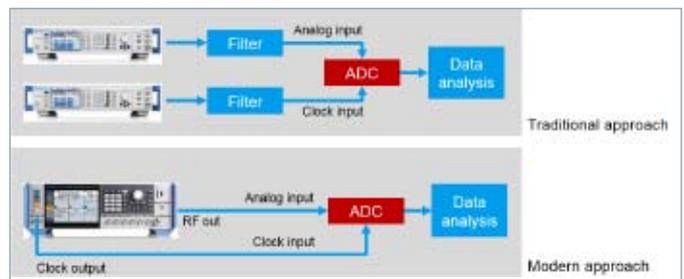


要实现高采样率以及高ENOB，需要宽带噪声极低的信号源。宽带噪声极低的时钟信号不会使ADC采样输入信号的信噪比SNR下降。R&S®SMA100B采用优化的RF设计以及全新的全数字化电平控制回路，在10 GHz载波频率下宽带噪声通常为-160 dBc/Hz。

此外，由于SMA100B内置滤波器，因此可在所有输出功率选件的高功率电平下实现-65 dBc（典型值）的谐波抑制。R&S®SMA100B独特地将高输出功率、低谐波和极低的宽带噪声相结合，避免了在ADC的总谐波失真THD指标测试上使用外部放大器和滤波器的必要性。



基于SMA100B的高速ADC参数测试方案如下图所示，新方案可以省掉一台信号源以及信号路径里的多余滤波器，极大简化了测试连接和仪表数目并提高了针对ADC的测试能力。



模拟信号源SMA100B

| 描述 | 选件名 | 货号 |
|---|------------|--------------|
| 8 kHz to 3 GHz | SMAB-B103 | 1420.8488.02 |
| 8 kHz to 6 GHz | SMAB-B106 | 1420.8588.02 |
| 8 kHz to 12.75 GHz | SMAB-B112 | 1420.8688.02 |
| 8 kHz to 20 GHz | SMAB-B120 | 1420.8788.02 |
| 2 HU with 5" touch display | SMAB-B92 | 1420.8288.02 |
| 2 HU with 7" touch display | SMAB-B93 | 1420.8388.02 |
| Ultra Low Phase Noise for R&S®SMAB-B106/-B112/-B120 | SMAB-B711 | 1420.8020.02 |
| Ultra Low Phase Noise for R&S®SMAB-B103 | SMAB-B711N | 1420.8120.02 |
| High Output Power 3 GHz/6 GHz | SMAB-K31 | 1420.7100.02 |
| Ultra High Output Power 3 GHz/6 GHz | SMAB-B32 | 1420.7200.02 |
| High Output Power 12.75 GHz/20 GHz | SMAB-K33 | 1420.7300.02 |
| Ultra High Output Power 12.75 GHz/20 GHz | SMAB-B34 | 1420.7400.02 |
| Differential Clock Synthesizer 3 GHz | SMAB-B29 | 1420.8088.02 |
| Clock Synthesizer Frequency Extension to 6 GHz (only for instruments equipped with R&S®SMAB-B106/-B112/-B120) | SMAB-K722 | 1420.9810.02 |
| Remote Control GPIB and USB | SMAB-B86 | 1420.6562.02 |

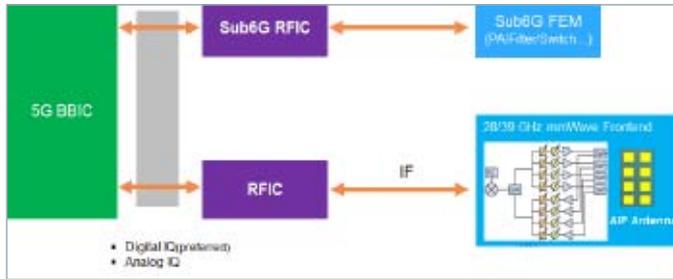
频谱仪FSW, 2 Hz ~ 8/13.6/26.5/43.5/50/67/85/90 GHz

| 描述 | 选件名 | 货号 |
|---|-----------|--------------|
| OCXO Precision Frequency Reference | FSW-B4 | 1313.0703.02 |
| RF Preamplifier | B24 | |
| Highpass Filter for Harmonic Measurements | FSW-B13 | 1313.0761.02 |
| 160 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B160 | 1325.4850.04 |
| 320 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B320 | 1325.4867.04 |
| 512 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B512 | 1331.7106.04 |
| 1200 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B1200 | 1331.6400.04 |
| 2000 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B2001 | 1331.6916.04 |
| 3GPP 5G-NR DL Measurements | FSW-K144 | 1338.3606.02 |
| 3GPP 5G-NR UL Measurements | FSW-K145 | |
| Phase Noise Measurements | FSW-K40 | 1313.1397.02 |

5G RFIC测试

5G终端在Sub 6G频段至少需要支持2T4R和100 MHz带宽，相较于LTE的1T2R和20 MHz带宽，其RFIC复杂度将显著提高。另外5G第一次引入毫米波26/28/39 GHz等频段，为了补偿毫米波传输带来的大差损问题，多天线模拟Beamforming成了必不可少的技术，因此毫米波Beamformer芯片的测试也同样刻不容缓。

未来中高端的5G终端会同时支持Sub 6G和毫米波，其简化的内部框图结构如下：



5G终端射频结构

BBIC和RFIC之间的接口在LTE时代以模拟差分IQ接口为主，但在5GNR时代数字IQ接口变得更为主流，罗德与施瓦茨的信号源和频谱仪既支持+1 GHz大带宽的模拟IQ接口，也能支持新型的大带宽数字IQ接口。



信号源SMW200A

| 描述 | 选件名 | 货号 |
|--|----------|--------------|
| Wideband Baseband Generator with ARB (256 Msample), 500 MHz RF bandwidth | B9 | 1413.7350.02 |
| Wideband Baseband Main Module, two I/Q paths to RF | B13XT | 1413.8005.02 |
| 100 kHz to 6 GHz | B106 | 1413.0104.02 |
| 100 kHz to 12.75 GHz | B112 | 1413.0204.03 |
| 100 kHz to 20 GHz | B120 | 1413.0404.02 |
| 100 kHz to 31.8 GHz | B131 | 1413.8605.02 |
| 100 kHz to 40 GHz | B140 | 1413.0604.02 |
| Enhanced Phase Noise Performance and FM/φ M Modulator | SMW-B22 | 1413.2207.02 |
| Baseband Extension to 1 GHz RF bandwidth | SMW-K525 | 1414.6129.02 |
| Baseband Extension to 2 GHz RF bandwidth | SMW-K527 | 1414.6158.02 |
| Wideband differential analog I/Q outputs | SMW-K17 | 1414.2346.02 |
| 5G New Radio | SMW-K144 | 1414.4990.02 |
| Digital Baseband Output for R&S®SMW200A Wideband Baseband | SMW-K19 | 1414.3865.02 |

频谱仪FSW, 2Hz ~ 8/13.6/26.5/43.5/50/67/85/90 GHz

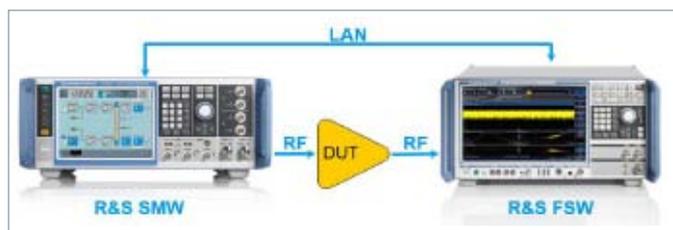
| 描述 | 选件名 | 货号 |
|--|-----------|--------------|
| OCXO Precision Frequency Reference | FSW-B4 | 1313.0703.02 |
| RF Preamplifier | B24 | |
| Highpass Filter for Harmonic Measurements | FSW-B13 | 1313.0761.02 |
| 160 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B160 | 1325.4850.04 |
| 320 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B320 | 1325.4867.04 |
| 512 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B512 | 1331.7106.04 |
| 1200 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B1200 | 1331.6400.04 |
| 2000 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B2001 | 1331.6916.04 |
| 3GPP 5G-NR DL Measurements | FSW-K144 | 1338.3606.02 |
| 3GPP 5G-NR UL Measurements | FSW-K145 | |
| Noise Figure Measurements | FSW-K30 | 1313.1380.02 |
| Phase Noise Measurements | FSW-K40 | 1313.1397.02 |
| Analog Baseband Inputs,40 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B71 | |
| 80 MHz Analysis Bandwidth for Analog Baseband Inputs | FSW-B71E | 1313.6547.02 |
| Oscilloscope Baseband Inputs | FSW-B2071 | 1331.8302.02 |

功率放大器PA测试

宽带功放数字预失真测试方案

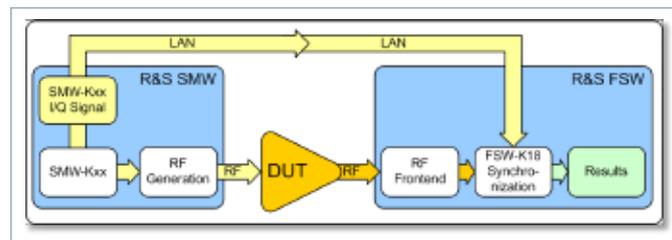
I 功放预失真测试系统搭建及测试流程简介

针对放大器测试，R&S除了可以提供传统的测试工具网络分析仪之外，还可以提供基于信号源SMW200A和频谱仪FSW的测试方案。利用该方案，信号源和频谱仪可以通过网线进行通信，可以轻松实现对功放数字预失真的闭环测试，且可以实现多次迭代测试。这套方案可以对功放数字预失真前后的各种重要指标如AM/AM、AM/PM、误差矢量幅度(EVM)、邻道泄漏比(ACLR)、1 dB压缩点、增益等进行同时测试。仪表连接示意图见图。



功放测试仪表连接示意图

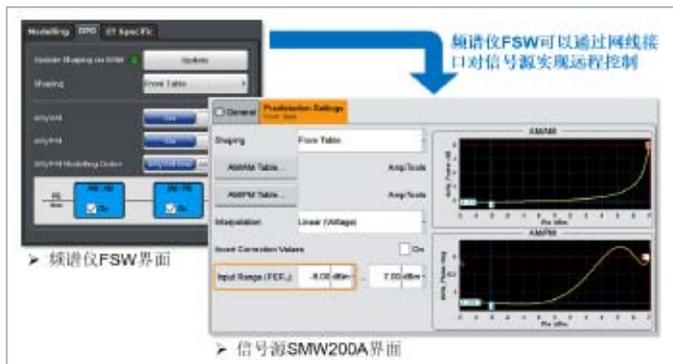
针对数字预失真测试，信号源SMW200A通过射频输出口提供激励信号，信号经过功放被放大之后产生失真并输出，失真后的信号被频谱仪FSW所接收，该信号被称为“测量”信号；同时SMW200A也会通过网线将原始IQ数据直接发送给FSW，这个信号称之为“参考”信号。频谱仪的功放测量选件FSW-k18会把“测量”信号和“参考”信号做同步运算，得到两者之间的差异，从而得到信号EVM等指标。系统流程示意图见图。



系统流程示意图

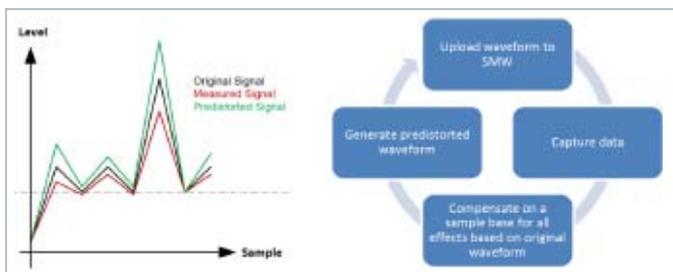
I 功放预失真测试系统功能简介

利用SMW200A和FSW组成的数字预失真测试系统，可以支持目前主流的查找表模型以及多项式模型等，如图3所示，就是FSW利用网线直接将AM/AM查找表和AM/PM查找表更新至SMW200A内部，SMW200A利用得到的查找表产生带有数字预失真的信号，经过被测件之后，再由FSW进行测试。



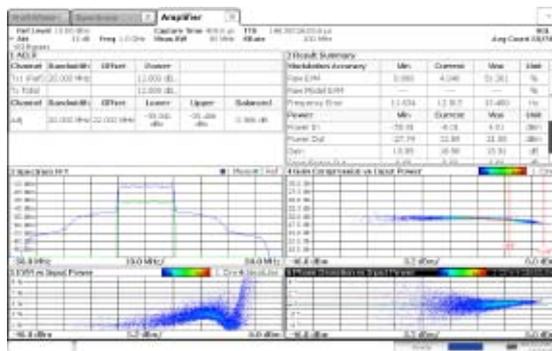
SMW200A和FSW数字预失真测试配置界面

除了常规的查找表以及多项式模型之外，R&S频谱仪FSW还提供一种独特的“直接”数字预失真（Direct DPD）测试方法。该测试方法不同于常规的方法，它没有采用任何数字预失真模型，而是在FSW内部采用对信号时域采样点进行逐点直接补偿的方式来实现实现数字预失真，执行完数字预失真补偿之后的数据会被通过网线传回给SMW200A并再次发射出来，信号经过被测功放产生失真之后，再次由FSW捕获后进行逐点直接补偿，该流程可被重复多次。简而言之，这种“直接”数字预失真的测试方法就是不依赖于模型，而是对每个采样点直接补偿，且可以实现多次迭代而进一步实现数字预失真优化。该方法由于不依赖于现有的预失真模型，所以也无法输出数字预失真模型参数，但是可以让用户通过最简单快捷的方式了解被测功放的“理想”预失真效果，而且该方法支持记忆效应和频响修正功能。这种“直接”数字预失真的逐点补偿及迭代示意图见图。

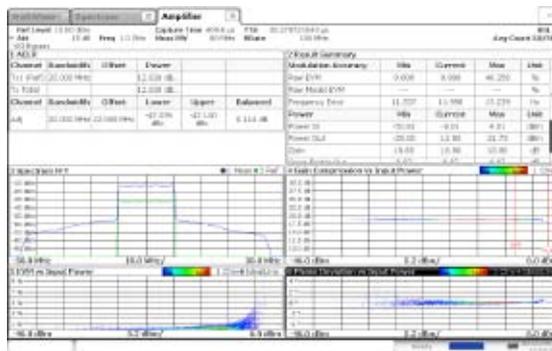


“直接”数字预失真方法的逐点补偿及迭代示意图

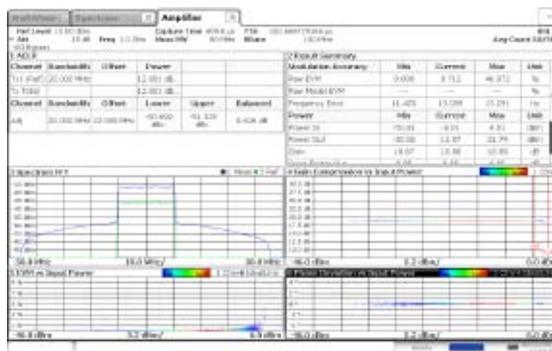
不管是“直接”数字预失真，还是基于模型的数字预失真，FSW都可以给出AM/AM、AM/PM、误差矢量幅度 (EVM)、邻道泄漏比 (ACLR) 等多项指标。图5三张图是采用“直接”数字预失真的方式得到的测试结果，其中图5a是数字预失真之前的测量结果，图5b是经过一次数字预失真后得到的测量结果，图5c是经过第二次数字预失真迭代之后得到的测量结果。从图5三张图的变化趋势可以看到误差矢量幅度 (Raw EVM) 从4%至0.9%再至0.7%持续优化，邻道泄漏比 (ACLR) 则从-35 dBc优化至-47dBc再至-50 dBc，从测试曲线图上来看，增益压缩曲线 (Gain Compression vs Input Power) 随着数字预失真迭代次数的增加线性区逐渐向高功率区域延伸，EVM曲线 (EVM vs Input Power) 也随着迭代系数增加在高功率下实现了EVM优化，AM/PM曲线 (Phase Deviation vs Input Power) 也随着迭代系数增加变得线性度更好。



图a 数字预失真之前的功放测量结果



5b 经过一次数字预失真运算后的功放测量结果

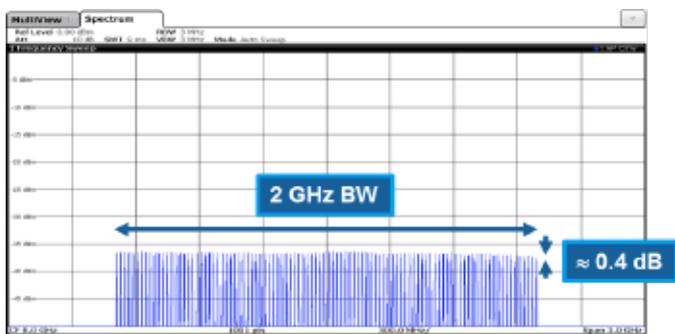


5c 经过两次迭代数字预失真运算后的功放测量结果

■ R&S数字预失真测试仪表性能

该测试方案主要由信号源SMW200A和频谱仪FSW组成，可以帮助客户快速的搭建一套放大器数字预失真测试平台，可以支持不同的数字预失真模型（查找表，多项式），还可以支持R&S独有的“直接”数字预失真测试方法，帮助用户快速确认放大器的“理想”预失真效果。此外，针对放大器测试，FSW配合SMW200A还支持包络跟踪放大器测试，进一步扩展了这套方案的适用范围。

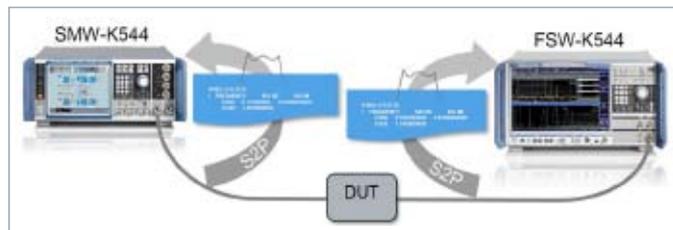
该方案中采用的信号源SMW200A单台仪表载频可以支持到40 GHz，信号带宽支持2 GHz，信号源内置宽带信号质量优化模式，这样就保证了信号源产生的宽带信号平坦度，图6中可以看到SMW200A输出的2 GHz宽带多音信号，利用频谱仪FSW测到的2 GHz之内的幅度平坦度约为0.4 dB，这就保证了功放的输入信号的质量。



SMW200A 2 GHz宽带多音信号幅度平坦度测试图

该方案中采用的频谱仪FSW单台仪表载频可以支持到90 GHz，内置2 GHz分析带宽，且FSW内置的放大器测量选件可以直接通过网线对信号源SMW200A实现远程控制，进一步简化了测试的复杂度。这样的话，SMW200A+FSW这种测试方案就可以支持2 GHz带宽，保证了用户可以对宽带高频放大器进行测试，按照数字预失真采样带宽为信号带宽5倍的惯例，该方案可以支持对带宽为400 MHz的信号进行理想的数字预失真测试。

有了理想的测试设备之后，还要考虑在放大器测试系统中，还可能包含射频线缆、预放、衰减器、滤波器等各种附件，这些附件本身的幅度频响和相位频响也会影响放大器的测试。针对这种场景，R&S的信号源SMW200A和频谱仪FSW都提供对应的k544选件，该选件允许用户将外部附件的S参数文件（SnP文件）导入到信号源和频谱仪里面，仪表会在数字域对外部附件的频响进行实时修正，从而大大减少外部附件自身频响对放大器测试的影响，示意图见图7。至于外部附件的S参数，则可以提前利用网络分析仪，功率计，频谱仪等设备测量得到。



信号源和频谱仪外部频响实时修正方法示意图

小结

本文针对数字预失真测试，介绍了基于R&S公司信号源SMW200A和频谱仪FSW的测试方案，该测试方案可以支持查找表、多项式等模式，同时还支持特有的“直接”数字预失真测试方案，让客户能够简单方便的得到放大器的“理想的”预失真效果。最后对测试仪表进行了简单的性能介绍，SMW200A单台仪表即可在40GHz频率内支持产生2GHz带宽的信号，FSW单台仪表则可以在90GHz之内对2GHz信号进行分析，这两台仪表的宽带特性非常适合用于宽带数字预失真测试。

订购信息

| 信号源SMW200A | | |
|--|----------|--------------|
| 描述 | 选件名 | 货号 |
| Wideband Baseband Generator with ARB (256 Msample), 500 MHz RF bandwidth | B9 | 1413.7350.02 |
| Wideband Baseband Main Module, two I/Q paths to RF | B13XT | 1413.8005.02 |
| 100 kHz to 6 GHz | B106 | 1413.0104.02 |
| 100 kHz to 12.75 GHz | B112 | 1413.0204.03 |
| 100 kHz to 20 GHz | B120 | 1413.0404.02 |
| 100 kHz to 31.8 GHz | B131 | 1413.8605.02 |
| 100 kHz to 40 GHz | B140 | 1413.0604.02 |
| Baseband Extension to 1 GHz RF bandwidth | SMW-K525 | 1414.6129.02 |
| Baseband Extension to 2 GHz RF bandwidth | SMW-K527 | 1414.6158.02 |
| 5G New Radio | SMW-K144 | 1414.4990.02 |
| Envelope Tracking | SMW-K540 | 1413.7215.02 |
| AM/AM, AM/φ M Predistortion | SMW-K541 | 1413.7267.02 |
| Wideband differential analog I/Q outputs | SMW-K17 | 1414.2346.02 |
| User-Defined Frequency Response Correction | SMW-K544 | 1414.3707.02 |

| 频谱仪FSW, 2Hz ~ 8/13.6/26.5/43.5/50/67/85/90 GHz | | |
|--|-----------|--------------|
| 描述 | 选件名 | 货号 |
| OCXO Precision Frequency Reference | FSW-B4 | 1313.0703.02 |
| RF Preamplifier | B24 | |
| 160 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B160 | 1325.4850.04 |
| 320 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B320 | 1325.4867.04 |
| 512 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B512 | 1331.7106.04 |
| 1200 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B1200 | 1331.6400.04 |
| 2000 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B2001 | 1331.6916.04 |
| Amplifier Measurements Application | FSW-K18 | 1325.2170.02 |
| Direct DPD Measurements | FSW-K18D | 1331.6845.02 |
| 3GPP 5G-NR DL Measurements | FSW-K144 | 1338.3606.02 |
| 3GPP 5G-NR UL Measurements | FSW-K145 | |
| User Defined Frequency Correction by SnP File | FSW-K544 | 1338.2716.02 |

锁相环PLL测试

为了能够测试得到锁相环PLL的真实性能，对于PLL的参考信号输入前提需要尽可能理想的CW信号，因此相噪性能目前业界最优的SMA100B是作为参考信号的最佳选择。另外为了测试PLL的输出信号质量，R&S专用的相噪分析仪FSWP在单次互相关，1 GHz中心频率，1 kHz频偏条件下典型值就能达到-156 dBc，还可以通过100/10000次互相关进一步提升10/20 dB相噪测量灵敏度。

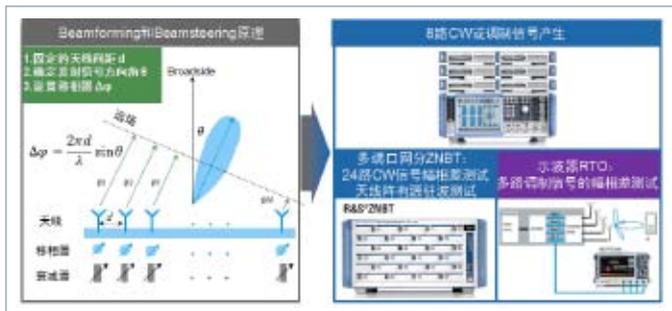
订购信息

| 模拟信号源SMA100B | | |
|---|------------|--------------|
| 描述 | 选件名 | 货号 |
| 8 kHz to 3 GHz | SMAB-B103 | 1420.8488.02 |
| 8 kHz to 6 GHz | SMAB-B106 | 1420.8588.02 |
| 8 kHz to 12.75 GHz | SMAB-B112 | 1420.8688.02 |
| 8 kHz to 20 GHz | SMAB-B120 | 1420.8788.02 |
| 2 HU with 5" touch display | SMAB-B92 | 1420.8288.02 |
| 2 HU with 7" touch display | SMAB-B93 | 1420.8388.02 |
| Ultra Low Phase Noise for R&S®SMAB-B106/-B112/-B120 | SMAB-B711 | 1420.8020.02 |
| Ultra Low Phase Noise for R&S®SMAB-B103 | SMAB-B711N | 1420.8120.02 |
| High Output Power 3 GHz/6 GHz | SMAB-K31 | 1420.7100.02 |
| Ultra High Output Power 3 GHz/6 GHz | SMAB-B32 | 1420.7200.02 |
| High Output Power 12.75 GHz/20 GHz | SMAB-K33 | 1420.7300.02 |
| Ultra High Output Power 12.75 GHz/20 GHz | SMAB-B34 | 1420.7400.02 |
| Differential Clock Synthesizer 3 GHz | SMAB-B29 | 1420.8088.02 |
| Clock Synthesizer Frequency Extension to 6 GHz (only for instruments equipped with R&S®SMAB-B106/-B112/-B120) | SMAB-K722 | 1420.9810.02 |
| Remote Control GPIB and USB | SMAB-B86 | 1420.6562.02 |

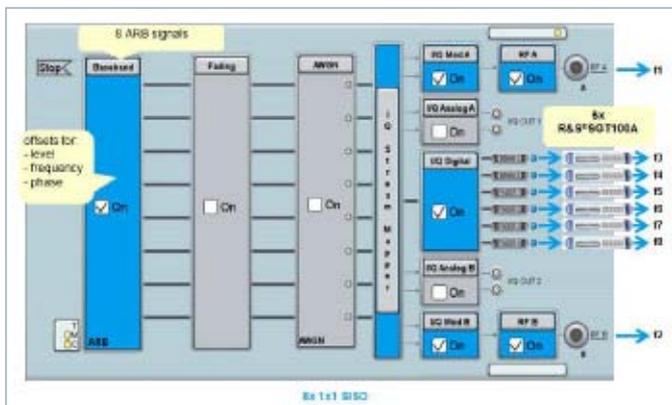
| 相噪分析仪FSWP8/26/50 | | |
|---|----------|--------------|
| 描述 | 选件名 | 货号 |
| Phase Noise Analyzer, 1 MHz to 8 GHz | FSWP8 | 1322.8003.08 |
| Phase Noise Analyzer, 1 MHz to 26.5 GHz | FSWP26 | 1322.8003.26 |
| Phase Noise Analyzer, 1 MHz to 50 GHz | FSWP50 | 1322.8003.50 |
| Cross-Correlation, 8 GHz | FSWP-B60 | |
| Cross-Correlation (low phase noise) | FSWP-B61 | |
| Additive Phase Noise Measurements | FSWP-B64 | 1322.9900.26 |
| Spectrum Analyzer | FSWP-B1 | |
| RF Preamplifier | FSWP-B24 | |

Massive MIMO传导测试

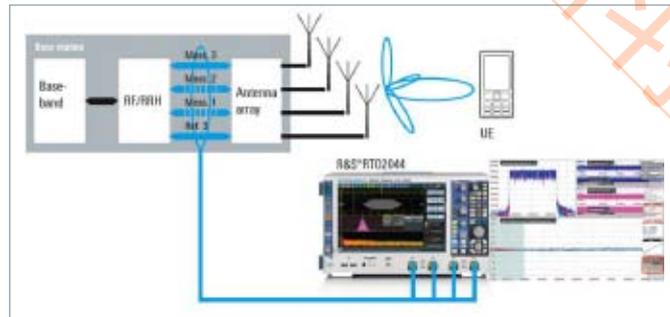
Massive MIMO测试分成TRX测试和天线测试两部分。TRX测试包括使用网络分析仪ZNB或ZNB+ZN-Z84完成单音或多音信号的幅度差和相位差校准测试，使用示波器完成调制信号的幅度和相位测试；天线测试包括用多路信号源模拟CW或调制信号作为天线的激励信号，在OTA环境下验证天线方向图/EIRP/TRP等指标。



一台双通道的SMW200A再搭配6个体积非常紧凑的SGT100A就能非常方便地构成8路相参的CW或调制信号，作为Massive MIMO天线阵的激励信号。而且这八路信号的基带都在SMW内部实现，非常方便实现基带共CLK，时延同步以及相位差调整。



使用R&S的多通道示波器RTO2044/2064单表支持多达4路调制信号的幅度相位差测试，再增加一台RTO可以同时测量的通道数达到7路。



根据自适应天线阵的自身技术特点，可将测量分为两类：电参数测量和辐射特性测量。

- 1) 电参数测量：与S参数全矩阵相关的测量。
- 2) 辐射特性测量：各天线单元的方向图和增益、典型扫描波束的方向图和增益。

自适应天线阵的辐射特性测量原理和传统天线阵类似，在此不再赘述。下文以8单元一维自适应（智能）天线阵为例，详细介绍各项电参数指标的测量。

自适应天线阵的电参数主要指标包括：各天线端口有源反射系数、各天线端口无源反射系数、各天线单元端口间隔离度（耦合度）、校准口到各天线单元的幅度相位一致性。

有源反射系数测量

某个端口的有源反射系数是指：在其它所有端口有真实幅相激励条件下，此端口测量得到的反射系数值，也就是考虑互耦效应影响的反射系数值。有源反射系数指标的优劣直接反映了天线阵的互耦效应强弱。

根据下面的S参数激励矩阵模型：

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{18} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{28} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{81} & S_{82} & \dots & S_{88} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_8 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

可以推出各端口的有源反射系数为：

$$\Gamma_N = \frac{b_N}{a_N} = \frac{S_{N1} \times a_1 + S_{N2} \times a_2 + \dots + S_{N8} \times a_8}{a_N} \quad | N = 1, 2, \dots, 8 \quad (2.2)$$

由式 (2.2) 可得端口1的有源反射系数，通用表达式为：

$$\Gamma_1 = \frac{b_1}{a_1} = \frac{S_{11} \times a_1 + S_{12} \times a_2 + \dots + S_{18} \times a_8}{a_1} = S_{11} + S_{12} \times a_2 / a_1 + \dots + S_{18} \times a_8 / a_1 = S_{11} + C_{12} + \dots + C_{18} \quad (2.3)$$

上述线阵进行波束扫描时，若各单元的幅度激励相同，仅对各单元相位加权。结合公式 (1.3)，可得端口1的有源反射系数为：

$$\Gamma_1 = \frac{b_1}{a_1} = \frac{S_{11} \times 1 + S_{12} \times e^{j\varphi} + S_{13} \times e^{j2\varphi} + \dots + S_{18} \times e^{j7\varphi}}{a_1} \quad (2.4)$$

其中 $\varphi = kd \sin \theta$

由式 (2.3) 和 (2.4) 可知，若要得到任意单元的有源反射系数，需首先测量所有天线单元的S参数全矩阵。

无源反射系数测量

某个端口的无源反射系数是指：在其它所有端口都接匹配负载条件下，此端口测量得到的反射系数值（S_{nn}），即 S₀₀、S₁₁、S₂₂、…、S₃₃、S₈₈。无源反射系数指标反应了天线各单元的基本匹配性能。

端口隔离度测量

测量各天线端口之间的隔离性能，在实际应用中一般主要关注较近端口间的隔离。如S₁₂、S₂₃、S₃₄、S₄₅、…、S₇₈、S₁₃、S₂₄、S₃₅…S₆₈等。隔离度指标的优劣也是天线单元互耦效应（仅幅度信息）强弱的一种体现形式。

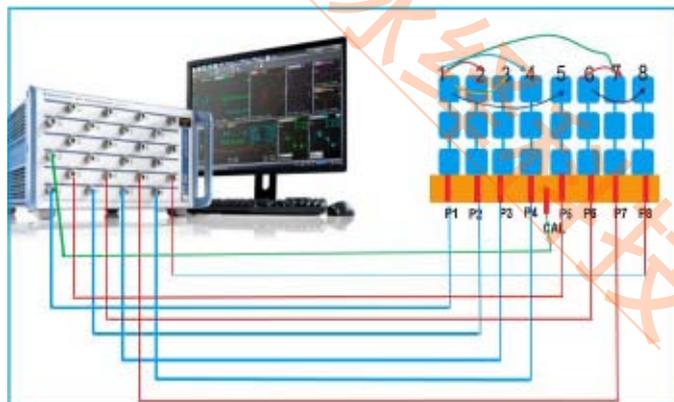
幅度相位一致性测量

幅相一致性测量是指，天线校准口（CAL）到各天线单元的幅相一致性指标。即S₀₁、S₀₂、…、S₀₇、S₀₈的幅度相位特性。幅相一致性指标的优劣，直接反应了各天线单元的设计、生产一致性。

由上述测试参数描述可知，自适应天线阵列不仅测试端口较多，且测试项目复杂度比普通天线要高很多。因此，普通2端口或4端口矢量网很难满足自适应天线阵列的测试要求。

R&S公司ZNB多端口测量解决方案

R&S®ZNB是市面上性能最优、速度最快的多端口解决方案。单台ZNB最多可支持24个测量端口，测量频率上限为20 GHz，该仪器完成一个24X24全矩阵S参数测量，只需512 mS。它具有强大的轨迹运算功能，是高性能自适应天线阵列用户研发生产的最佳选择，R&S®ZNB相对于传统VNA，测试速度和测试精度优势明显。



| | R&S ZNB (24端口) | 传统VNA (2端口) | 传统VNA (4端口) |
|--------------|-------------------|----------------|----------------|
| 总测量连接次数 | 1 | 37 | 10 |
| 总测量时间 | <100 mS | >30 Min | 8 Min |
| 幅度测量精度@3 GHz | 0.01 dB | 0.05 dB | 0.05 dB |
| 相位测量精度@3 GHz | 0.5度 | 2度 | 2度 |

表1 9X9 S参数全矩阵测试，201点，IFBW=100 KHz

基于R&S®ZNB矢量网络分析的多端口矩阵 (R&S®ZN-Z84) 扩展方案

基于R&S®ZNB和R&S®ZN-Z84矩阵的多端口扩展方案，单台主机最多可扩展成48个测量端口。R&S®ZN-Z84开关矩阵即插即用，与R&S®ZNB主机连接方便。该方案测量频率上限为8.5 GHz，完成一个9X9全矩阵S参数测量，时间不足300 mS。同样它具有强大的轨迹运算功能，是自适应天线阵列用户研发生产的良好选择。R&S®ZNB+R&S®ZN-Z84多端口矩阵扩展测量方案如图4所示。R&S®ZNB和R&S®ZN-Z84矩阵多端口方案相对于传统VNA，测试速度和测试精度有较大优势，具体对比数据如表2所示。

| | R&S ZNB (4端口) +R&S ZN- 84(4X24) (24端口) | 传统VNA (2端口) | 传统VNA (4端口) |
|--------------|--|----------------|----------------|
| 总测量连接次数 | 1 | 37 | 10 |
| 总测量时间 | <300 mS | >30 Min | 8 Min |
| 幅度测量精度@3 GHz | 0.02 dB | 0.05 dB | 0.05 dB |
| 相位测量精度@3 GHz | 1度 | 2度 | 2度 |

表2 9X9 S参数全矩阵测试，201点，IFBW=100 KHz

自适应天线阵列的设计极其复杂尤其是互耦效益的去除，采用先进的测量手段进行指标验证尤为重要。每个天线阵都有庞大的射频端口数，每个阵中单元都需考虑周边大量端口对其自身的影响，因此迫切需求高性能、高效率多端口矢量网络分析仪测量方案。

R&S®ZNB T单台仪器可以达到24端口，结合扩展矩阵最多可扩展至144个测量端口。它是市面上性能最优、速度最快的

多端口测量方案，是5G通信 Massive MIMO 天线研发生产的最佳选择。

基于R&S®ZNB 和R&S®ZN-Z84矩阵的多端口扩展测量方案，最多可扩展至48个测量端口，它也是自适应天线阵列用户研发生产的良好选择。

订购信息

| 矢量信号源SMW200A | | | |
|--|----------|----|--------------|
| 描述 | 选件名 | 数量 | 货号 |
| Baseband Generator with ARB (64 Msample) and Digital Modulation (realtime), 120 MHz RF bandwidth | SMW-B10 | 2 | 1413.1200.02 |
| Signal Routing and Baseband Main Module, two I/Q paths to RF | SMW-B13T | 1 | 1413.3003.02 |
| 100 kHz to 6 GHz | SMW-B106 | 1 | 1413.0104.02 |
| 100 kHz to 6 GHz | SMW-B206 | 1 | 1413.0904.02 |
| Fading Simulator | SMW-B14 | 4 | 1413.1500.02 |
| Phase Coherence | SMW-B90 | 1 | 1413.5841.02 |
| Multiple Entities | SMW-K76 | 1 | 1413.9624.02 |
| MIMO Fading/Routing | SMW-K74 | 1 | 1413.3632.02 |
| Digital Baseband Output | SMW-K18 | 2 | 1413.3432.02 |
| 5G New Radio | SMW-K144 | 2 | 1414.4990.02 |

| 矢量信号源SGT100A(单台配置) | | | |
|-------------------------------|-----------|----|--------------|
| 描述 | 选件名 | 数量 | 货号 |
| Frequency Extension to 6 GHz | SGT-KB106 | 1 | 1419.5708.02 |
| Reference Oscillator OCXO | SGT-B1 | 1 | 1419.5608.02 |
| Phase Coherent Input/Output | SGT-K90 | 1 | 1419.6333.02 |
| Digital Baseband Connectivity | SGT-K18 | 1 | 1419.6240.02 |

| 多端口网络分析仪ZNB T 8 GHz | | |
|--------------------------------------|-------------|--------------|
| 描述 | 选件名 | 货号 |
| Adds Ports 5 to 8, for R&S®ZNB T8 | ZNB T8-B108 | 1319.4200.02 |
| Adds Ports 9 to 12, for R&S®ZNB T8 | ZNB T8-B112 | 1319.4217.02 |
| Adds Ports 13 to 16, for R&S®ZNB T8 | ZNB T8-B116 | 1319.4223.02 |
| Adds Ports 17 to 20, for R&S®ZNB T8 | ZNB T8-B120 | 1319.4230.02 |
| Adds Ports 21 to 24, for R&S®ZNB T8 | ZNB T8-B124 | 1319.4246.02 |
| Precision Frequency Reference (OCXO) | ZNB T8-B4 | 332.9477.02 |

六 有源天线系统的OTA测试平台

5G的空分复用为多个用户提供数据，将使用多天线技术，通过结合增强为大规模MIMO。一个结论是不能采用传导方式评估辐射方向图性能，因此必需通过OTA方式。本文在介绍使用OTA测试设备测量天线三维方向图的技术要点之后，介绍OTA的具体测试方案。

5G在获得更低运营成本 (OPEX) 的同时确保更高的吞吐率、更多的容量和实现的灵活性。其它目标包括超可靠低延迟通信 (uRLLC) 和大规模机器类通信 (mMTC)。软件定义网络 (SDN) 和大规模MIMO多天线场景很可能是实现这些目标的技术选择。

为了获得更高的吞吐率必须有更宽的带宽支撑，5G系统将使用厘米波和毫米波范围的频率。这种方案的一个缺点是自由空间路径损耗将更大。提供更高天线增益的天线阵列可以补偿自由空间路径损耗。与900 MHz相比，为了在28 GHz频率上保持相同的接收功率，意味着天线增益要增加30 dB。使用大量天线单元并控制能量方向，这被称作波束赋形，可以实现这个目标。

波束赋形技术通过分配给每个用户设备 (UE) 的信号只瞄准相应的单个用户设备，显著降低了能量消耗。而没有使用波束赋形的基站，未被UE接收的能量可能对相邻的多个UE产生干扰，或者被直接丢弃。

诸如LTE或WLAN等的当前标准采用MIMO，通过空分复用获得较高容量。多用户MIMO技术使用波束赋形，通过同时发送数据到不同的多个UE，扩展了MIMO。术语大规模MIMO描述了根据硬件配置和信道条件，波束赋形和多天线空间复用以动态方式的结合 (图1)。

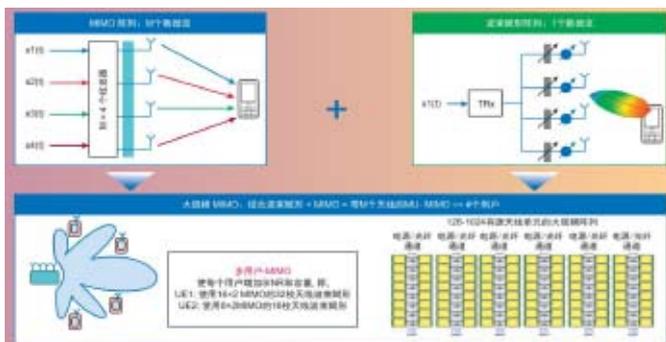


图1：大规模MIMO：波束赋形和空分复用组合

大规模MIMO面临的挑战

虽然大规模MIMO具有许多优点，但也存在一些挑战，包括：

1. 前传接口连接的高吞吐量
2. 天线阵列校准
3. 天线单元间的相互耦合
4. 不规则的天线阵列
5. 天线阵列的复杂性

大规模MIMO遭遇的挑战还来自如何表征信号，测量天线阵列功率的要求不曾在传统使用电缆传导接口的场合出现过。有意义的表征只能使用OTA (Over-The-Air) 测试实现。主要因为：成本、高频率下进行耦合带来的高插损等原因使得电缆测试方法不可行；以及大规模MIMO系统将无线收发器集成到天线中，这导致失去射频测试端口。具体的测试方法有以下几种。

近场测量和远场测量方案

OTA测量系统可以根据取样哪一部分辐射场来分类。近场区和远场区由Fraunhofer距离 $R=2 \times D^2/\lambda$ 定义，其中D是最大天线口径或尺寸。在近场区，在小于R的距离处，场强由感应分量和辐射分量组成；而在天线的远场区仅有辐射分量场强。对于到远场区的数学变换，需要精确测量包围被测设备三维表面上的相位和幅度，由此产生天线的2维和3维增益图。远场区测量仅需要用幅度计算天线的波束图，如果需要也可以在OTA单点处测量。对于小型设备（取决于波长），例如用户设备，对于远场条件所需的暗室尺寸由测量波长决定。对于较大的设备，例如基站或大规模MIMO，所需的暗室尺寸可能变得非常大。如果测量系统能够精确地对整个封闭表面上的电磁场的相位和幅度进行采样，则暗室尺寸可以大大减小。在远场区开展测量，需要直接测量平面波幅度，并且这样的暗室通常相当大，暗室大小要综合考虑被测设备尺寸和测量频率。

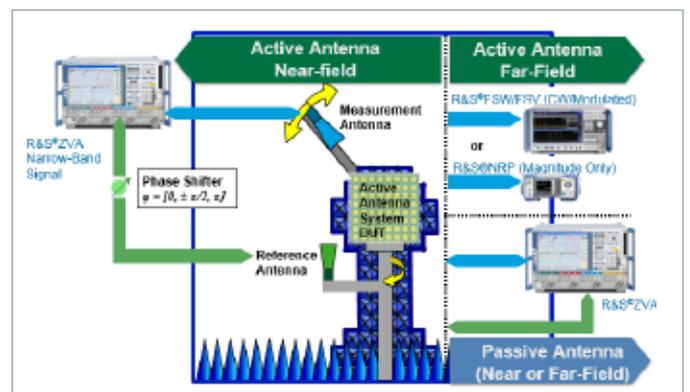


图2：OTA测试系统

罗德施瓦茨提供完整的OTA测试方案，如图2所示。测试系统由微波暗室，放置待测物的转台，天线摇臂以及测试仪表（网分，信号源，频谱仪等等）。根据测试的项目，选择合适的测试仪表，基于高精度的3D测试定位装置，在被测物周围的球面做自动化的采样测试，并记录所有的采样数据。采样完成后，测试软件会进行数据后处理，得到5G天线阵列的3D方向图等数据，并根据数据，分析得到其他的测量指标结果。

紧凑型测量方案

虽然远场通常是在离开被测设备适当距离处测量，但是可以通过控制电磁场，使得近场暗室可以用于直接测量平面波幅度。有两种技术：

- 紧凑型区域暗室，最经常用于大型被测设备，如飞机和卫星；
- 平面波转换器 (PWC)：在被测设备处创建平面波，这可以通过天线阵列替代测量天线实现。类似于在光学系统中使用透镜，天线阵列可以在被测设备区域内的目标区位置生成平面远场。下图为2018年R&S新推出的面向sub-6G Massive MIMO基站的测试系统：R&S®PWC200。

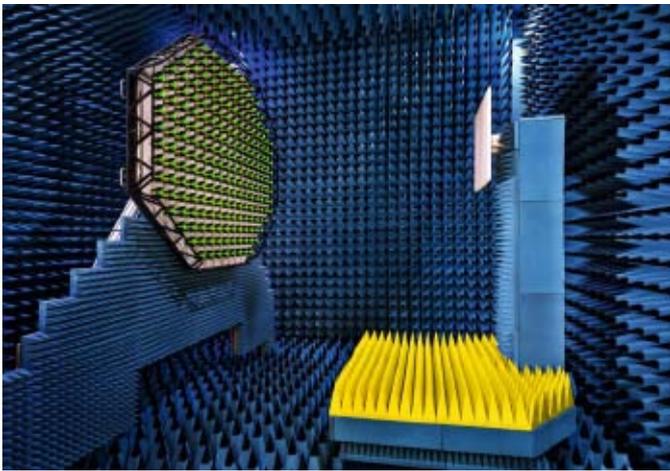


图3：平面波转换器 (PWC) 测试系统

R&S®PWC200平面波转换器由上百个宽带Vivaldi天线阵列组成，能够在原本辐射近场距离制定区域内形成平面波，从而达到远场测试的效果，因此大幅度的缩小远场测试空间。PWC200可以实现实时辐射功率和收发器测量 (EVM, ACLR, SEM等)，是测量5G Massive MIMO基站相控天线阵列的理想原则。

毫米波终端研发与一致性测量方案

罗德与施瓦茨公司2018年推出的新型R&S®ATS1000测试暗室 (图4) 能够帮助开发人员和产线工程师对天线模块，收发器，芯片组和无线设备进行5G空中 (OTA) 测量。天线和收发器的测量可以在18 GHz到87 GHz的频率范围内进行。因

此该系统支持目前5G所关注的所有毫米波频段。另外，紧凑的测试室设计仍然可以实现在远场情况下测量移动设备。



图4：R&S® ATS1000测试暗室

用于天线阵列的快速OTA测试

R&S®ATS1000主要由一个RF屏蔽室，以及覆盖整个频率范围的宽带测量天线构成。屏蔽室体积为机架尺寸，并且装有脚轮，有利于待测物件与传感器的合理装配。使用相关的测试和测量设备以及R&S®AMS32天线测量软件，可以在几分钟内完成5G天线阵列的辐射方向图的精确测量。定位激光器有利于精确控制待测物件的摆放位置。所有这些赋予了R&S®ATS1000天线测试系统快速，准确，可重复性强的特点，使其成为一套理想的测试环境。

首例3GPP 5G NR 射频测量

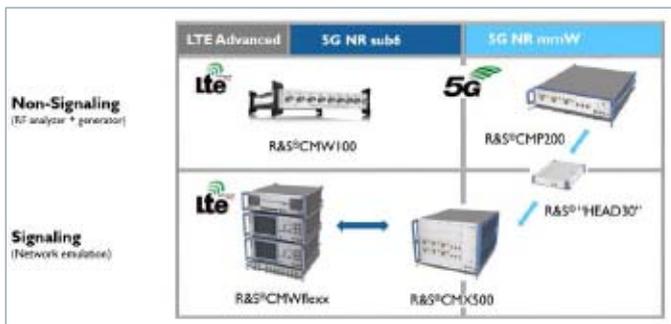
通过结合R&S®ATS1000与R&S®TS8980 5G RF测试系统，用户可以从OTA的测量中得到相关的RF参数 (例如：功率，ACLR和EVM)。这点对5G测试来说非常关键，因为许多5G组件没有任何射频接口，无法在传导模式下进行测试。另外，该系统能够对5G器件进行全面的3D表征，验证测量和功能测试。罗德与施瓦茨的一致性测试方案会结合业界成熟的R&S®CONTEST软件将结果以3D图形的形式呈现出来。

结论

天线阵列将在未来的无线通信中发挥重要作用。然而在它们的研发、设计和生产中遇到的挑战使得完整测试对于实现最佳性能至关重要。射频测试端口消失以及使用厘米波和毫米波频率，使得OTA测试成为表征大规模MIMO阵列和内部收发器性能的必要手段。这将会推动OTA暗室和测量设备的大量需求，以便满足测量天线辐射特性和收发器性能的严格要求。R&S拥有传导测试和OTA测试完整的解决方案，可以满足5G阵列天线的测试需求。

七 5G终端测试平台

5G NR终端研发和生产射频测试方案



上图为R&S公司为5G NR终端射频研发及生产提供的完整方案。

Sub6G 5G NR生产测试 – R&S®CMW100

R&S现有的CMW100产线测试仪最新版本已经支持Sub 6GHz 5G NR发射和接收测试。该解决方案完全支持2G、3G、4G和5G蜂窝技术以及非蜂窝技术，是一台理想的产线非信令全制式测试仪表。

毫米波5G NR生产测试 – R&S®CMP200+HEAD30

R&S最新推出的R&S CMP200无线通信测试仪，配合Remote Radio Head HEAD30变频器，可用于28 GHz和39 GHz毫米波频段的5G NR产线测试。该测试仪专为5G OTA测量而设计，用户可以将HEAD30尽可能靠近OTA测试暗室，以减少测量过程中的电缆损耗。CMP200配合R&S的OTA暗室即可组成一个完整的5G毫米波OTA测试解决方案。

Sub6G 5G NR信令测试 – R&S®CMWflexx+CMX500

从1.1节5G NR演进过程可以看到，很多现有LTE网络的运营商将在未来很长一段时间内选择NSA组网方式。NSA的组网方式，可以将5G NR看作是在现有LTE网络的一个扩展。与此相对应地，R&S公司在现有的支持LTE信令测试的CMWflexx基础上，增加一台支持5G NR信令的CMX500，组成支持5G NR信令测试的方案。

毫米波5G NR信令测试 –

R&S CMWflexx+CMX500+HEAD30

使用CMWflexx扩展CMX500，配合Remote Radio Head HEAD30变频器，可用于28 GHz和39 GHz毫米波频段的5G NR信令测试。该系统配合R&S的OTA暗室即可组成一个完整的毫米波5G NR OTA测试解决方案。

5G NR终端研发和生产方案订购信息

| 产品型号 | 主要特性 | 备注 |
|-------------------------|--|----|
| Sub6GHz 生产测试仪 CMW100 | CMW-KM6000, KW6000 | |
| 毫米波生产测试仪 CMW200 | | |
| CMWflexx | CMWC CMW500: CMW- PS505, PK364, B100H, B500I*2, B450I, S570H, B570H*3, S590D, B590D, B540I CMW-Z24 | |
| 5G NR信令综测仪 CMX500 | | |
| 变频器 RRH HEAD30 | | |
| OTA暗室 ATS1000 | | |

5G NR终端协议测试方案

随着无线标准的不断演进，无线通信芯片结构也愈加复杂，芯片厂商在决定流片前都会对每项功能进行充分的仿真验证，只有经过详尽测试覆盖才能将风险降到最低，提高流片成功率。

5G NR协议物理层测试 – R&S®CMWflexx+CMX500

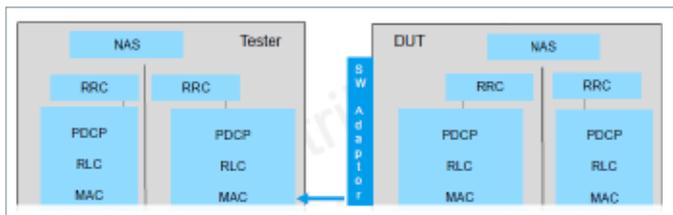
IQoverIP

无线通信芯片开发在完成算法链路验证后，下一步工作是把算法链路转化成硬件RTL具体实现。此时需要在FPGA开发板或者EDA厂商提供的硬件模拟器平台上验证芯片RTL实现的正确性，Synopsys公司的ZEBU平台及HAPS平台是此类硬件模拟器平台的典型代表。R&S公司和Synopsys保持着良好的合作关系，携手为无线通信芯片客户提供的IQoverIP测试方案，为无线通信芯片客户早期的物理层功能及性能的验证提供了极大的便利。

5G NR协议栈虚拟测试 – R&S®PC VT

对于大部分无线通信芯片客户来说，上层协议栈的开发与物理层的开发是同步进行的。所以，为了能够加快芯片的上市步伐，除了需要验证物理层的实现，有必要同时验证上层协议栈的实现。

针对该需求，R&S公司提供一个纯软件的虚拟测试方案，如下图所示，网侧与DUT基于MAC层的传输块进行交互，验证终端的上层协议栈是否符合规范定义的流程。



5G NR Full BBIC协议测试—

R&S®CMWflexx+CMX500 IQoverIP

无线通信芯片在完成物理层及上层协议栈独立的充分验证后，下一步就需要将物理层和上层协议栈融合在一起，形成一块完整的基带芯片。在此过程中，有可能会碰到很多兼容性的问题。此时，依然可以采用R&S与Synopsys的IQoverIP方案对该基带芯片进行功能验证。

5G NR 协议一致性测试—

R&S®CMWflexx+CMX500+HEAD30

协议一致性测试的定义是：“一个一致性的实现应满足静态一致性需求和动态一致性需求，并与协议实现一致性声明 (Protocol Implementation Conformance Statements, PICS) 中所声明的功能相符合。”一致性测试主要是确定被测终端是否与标准规定一致。通常利用一组测试用例，在一定的网络环境下，对被测终端进行黑盒测试，通过比较DUT的实际输出与预期输出的异同，判定DUT 是否与协议描述相一致。

一致性测试只关心协议实现呈现于外部的性能。对于手机行业来说，我们知道现在世界上很多手机的品牌，也有众多的移动通信网络设备的制造商，他们所生产出来的手机和网络设备被销往全球的不同地方，因此为了能保证不同厂商的手机和不同的网络设备之间能正常工作，通过一致性测试会提高人们对不同设备符合相应协议标准的置信程度，提高相同标准不同实现之间互连的概率。

在理想的情况下，不同手机厂商按相同协议标准生产出来的手机本应在不同网络设备厂商的网络环境下正常通信。但是实际情况并非如此，由于设计者对标准的不同理解，导致手机的某些性能要么偏离标准，要么是标准的一个子集。这些不同程度与标准不一致的手机将不能正常工作，因此需用统一的尺度来衡量手机的一致性，从而保证不同的手机之间，不同的手机和网络之间可以正常通讯。

因此，协议一致性测试是众多运营商强制要求的测试内容。作为终端厂家或者是手机芯片厂家，为了更好地验证终端的协议一致性要求，一致性测试一个非常重要的必不可少的环节。

R&S提供针对5G NR协议一致性测试的完整解决方案，该方案包括：CMWflexx, CMX500, RRH HEAD30, ATS1000。

2.2.5 5G NR 协议测试方案订购信息

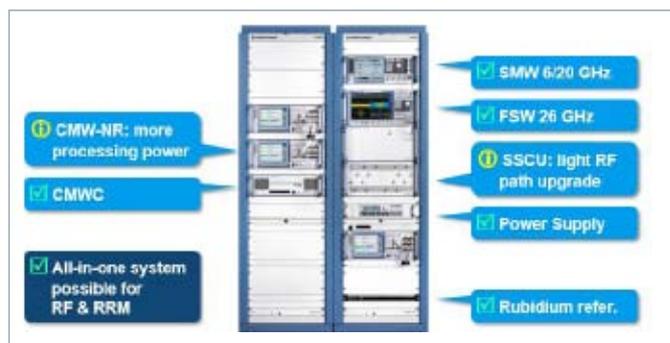
| 产品型号 | 主要特性 | 备注 |
|----------------------|---|----|
| CMWFlexx | CMWC CMW500: CMW-PS505, PK364, B100H, B500I*2, B450I, S570H, B570H*3, S590D, B590D, B540I CMW-KP090, KF600, KI600, KR515 CMW-Z24 | |
| 5G NR信令综测仪 CMX500 | | |
| 变频器 RRH HEAD30 | | |
| OTA暗室 ATS1000 | | |

5G NR终端射频一致性测试方案

3GPP 不仅定义了5G NR系统和终端的核心规范，而且还定义5G NR终端一致性测试规范，其中终端射频一致性测试标准是38.521。测试内容主要包括：终端的发射机特性、接收机特性和性能需求等射频指标。

Sub6G 5G NR终端射频一致性测试方案—R&S®TS8980

现有的TS8980FTA-3系统支持2G/3G/4G/C-IoT等接入技术的射频一致性测试。并且，由于系统中所有的硬件都已经支持Sub6GHz，Sub6G 5G NR的测试仍可以采用目前的传导方式。所以，可以认为现有的TS8980FTA-3系统是5G-ready的系统。要增加支持Sub6 5G NR的射频一致性测试，只需要做少许的升级即可，包括：增加CMX500以支持5G NR的信令；升级SSCU射频通道。



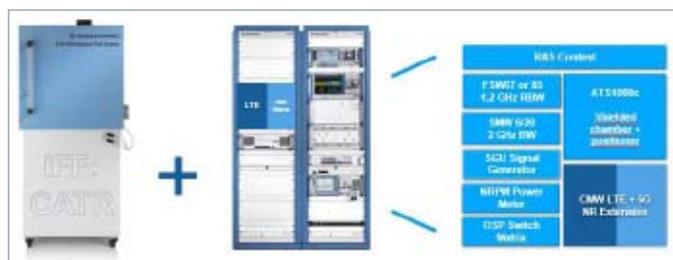
Sub6G 5G NR终端射频一致性测试方案的订购信息

| 产品型号 | 主要特性 | 备注 |
|----------------------|--|----|
| 协议测试仪 CMW500 | CMW-PS505, PK364, B500I*2, B450I, S570H, B570H*3, S590D, B590D CMW-KP090, KR515, | |
| 5G NR协议测试仪 CMX500 | | |
| 频谱仪FSW26 | FSW-B3, B8, B28 | |
| 信号源SMW200A | SMW-B10*2, B14*2, B13T, B81, B106, B220 | |
| 功率计NRP33S | | |
| 射频通道SSCU3A/3B | | |
| 时钟源CS-RUB6 | | |
| 主控机PC | | |

毫米波5G NR终端射频一致性测试方案 –

R&S®TS8980-3AM+ATS1000

由于毫米波5G NR随着传输距离的增大，信号急剧衰减，另外，使用毫米波的无线通信终端的天线极小且数量巨大，所以对于毫米波5G NR的终端测试来说，不能再采用传统的传导方式，而需要采用OTA的方式。R&S提供毫米波5G NR的射频一致性测试方案，包含TS8980FTA-3AM与ATS1000的OTA暗室，如下图所示。



毫米波 5G NR终端射频一致性测试方案的订购信息

| 产品型号 | 主要特性 | 备注 |
|----------------------|--|----|
| 协议测试仪 CMW500 | CMW-PS505, PK364, B500I*2, B450I, S570H, B570H*3, S590D, B590D CMW-KP090, KR515, | |
| 5G NR协议测试仪 CMX500 | | |
| 频谱仪FSW67/85 | | |
| 信号源SMW200A | SMW-B10*2, B14*2, B13T, B81, B106, B220 | |
| 信号源SGU | | |
| 功率计NRPM | | |
| 切换单元OSP | | |
| 射频通道SSCU3A/3B | | |
| 时钟源CS-RUB6 | | |
| 主控机PC | | |
| OTA 暗室ATS1000 | | |

八 5G网络覆盖测试平台

针对国内已经开始部署5G小规模试验网，第一步就是基站选址及链路损耗测量。对此R&S公司提供可支持到6 GHz的扫频仪，可用于3.5 GHz、4.8 GHz等频点的实测。具体的系统搭建是“信号源+放大器+发射天线”来模拟5G基站发射，“扫频仪+路测软件+接收天线”来模拟5G接收终端，按照路测的方式让扫频仪在不同地点测试链路的实际损耗，从而帮助客户优化基站选址，验证链路损耗仿真结果。

伴随着5G小规模试验网的部署，干扰查找也是一个热门的话题。对此R&S发布了专用的干扰定位仪MNT100，MNT100配备的强大的预选功能以及无与伦比的实时处理速度，能够快速定位各种突发干扰信号。此外MNT100配合测向天线ADD207以及自动无线电定位软件Mobile Locator，通过测量信号到达角度（AOA，Angle of Arrival）的方式有效的克服多径传播带来的干扰查找定位误差，从而实现快速的自动化干扰查找。

咏绎科技

物联网综合测试大平台

随着物联网技术的快速发展，物联网行业以指数级的速度在飞速前进。在大数据和大连接的背景下，物联网应用越来越广泛。物联网技术主要分为两大组成部分，一部分是广域网通信技术（LPWAN），其中工作在授权频谱的物联网技术以NB-IoT和eMTC为代表，而非授权频谱工作在非授权频段，如Lora、Sigfox等。另外一部分是以Zigbee、WiFi等为代表的短距离通信技术。每种技术都有各自的优缺点和应用场景，这使得在物联网大连接时代的技术出现百花齐放、百家争鸣的特点。

在授权频谱的广域网通信技术中，目前主要包括EC-GSM，eMTC以及NB-IoT。而NB-IoT凭借大连接，广覆盖，低功耗，低成本这些特点使得其在成立之初就备受关注，3GPP于2016年6月完成了NB-IoT (Release13) 标准核心部分，之后的性能部分和一致性部分在同年9月和12月快速制定完成。进入2017年以来，中国三大运营商分别宣布将采用NB-IoT技术部署基站设备，芯片厂商纷纷推出自己研发的基于NB-IoT标准的物联网芯片，进一步加快了NB-IoT的商业化步伐。

一 WLAN 综合测试平台

WLAN 802.11a/b/g/n/ac/ax

随着移动通信技术的快速发展，作为其中重要的一员，WiFi变得越来越重要。几乎所有智能手机、平板电脑和笔记本电脑都需要支持WiFi连接，毫无疑问，WiFi是当今使用最广的一种无线通信技术。然而，在过去很多年，由于市场监管和测试成本的种种原因，很多产品的WiFi部分被作为附属网络功能，没有被测试或只进行简单的测试。为了在市场竞争处于更有利的位置，移动终端生产厂家越来越注重产品质量和用户体验，在实验室引入WiFi产品的测试环境，如射频测试环境、OTA测试环境以及应用测试环境，生产则只对每个产品的射频性能进行测试。

信令测试

信令是通讯设备之间的语言，它们按照既定的通讯协议工作，将应用信息安全、可靠、高效地传送到目的地。这些信息在通信网络中叫做信令。搜索网络、接入网络以及上网冲浪，这些都是终端的基本功能。在这些过程中，WiFi终端之间需要大量的信令消息传递。测试仪作为AP（路由器）或Station（终端）模拟器，完整的模拟了这些信令交互过程，并在这些过程中，测量各项射频指标，根据测试标准门限，就可以判断该被测件是否能正常工作及其性能优劣。我们称这种测试方法为信令测试。所以，信令测试不仅可以对终端的射频指标进行评估，也可以判断被测件常用的通讯协议是否正确。



图1：信令测试环境

信令测试是在被测件与测试仪表之间互动的一种测试方案，测试仪表可以根据测试要求，控制被测件进行工作。如图1所示，被测件与仪表之间通过射频连接：1、通过射频线缆直接连接，可测试射频的相关指标；2、通过天线进行耦合连接，测试OTA下的终端性能。

非信令测试

在现阶段，WiFi产品的射频测试可以采取一种非信令的测试方法，即一台测试仪表连接一个被测件，通过一台电脑，分别控制测试仪表和被测件，按照规定的测试序列，自动测试WiFi产品的射频性能。图2为一个典型的非信令测试环境，图中测试仪表为罗德与施瓦茨公司的综合测试仪CMW500，被测件为一个手机，电脑通过控制总线分别控制CMW500和手机。



图2：非信令测试环境

非信令测试方案中，被测件和仪表接收来自于主控PC的指令：PC机首先通过芯片公司提供的软件控制被测件产生需要测试的信号，然后操作仪表进行测试。

与信令测试相比，非信令测试忽略了信令交互的过程，仅仅对射频性能进行测试，并且需要测试人员熟悉芯片控制软件。

总结

随着无线通信技术的高速发展，使得无线产品竞争越来越激烈。为了生产性能更好的产品，围绕产品的测试将越来越丰富。要进行更完善的测试，需要耗费更多的测试时间，因而，我们有必要在各个阶段选择合适的测试方案，以最低的测试成本实现产品性能最优化。罗德与施瓦茨公司的CMW270/500支持WLAN 802.11a/b/g/n/ac/ax等各种标准，支持信令和非信令测试，助力WLAN芯片研发、终端研发和产线快速生产测试等各个阶段。

订购信息

| 综测仪CMW270或CMW500 | | |
|---|--------|--------------|
| 描述 | 选件名 | 货号 |
| Wideband Radio Communication Tester Base unit with following accessories: power cord, operating manual (quick start guide), | CMW270 | 1201.0002K75 |
| Wideband Radio Communication Tester Base unit with following accessories: power cord, operating manual (quick start guide), | CMW500 | 1201.0002K50 |

WLAN 802.11ad

随着智能手机、电视和平板电脑等各种无线终端的大量普及，视频等高速数据交互变得更加频繁，数据吞吐量呈现了爆发式增长态势，这些需求推动着无线通信技术不断向前发展，一种可在短距离上进行超高速无线传输的标准 IEEE 802.11ad 应运而生，该技术也被称为 WiGig。

802.11ad 是近十年来对 IEEE WLAN 标准的一次革命性更新，它首次引入了 60 GHz 毫米波工作频段，而之前 802.11n 工作在 2.4GHz 或 5GHz 频段，802.11ac 工作于 5GHz 频段，而 60 GHz 频段拥有比 5GHz 频段大数十倍以上的工作带宽。

802.11ad 的技术优势体现在以下几方面：

I 高速率

- 11ad 标准理论最高速率可到 7 Gbps，虽然 11ac 通过使用 8x8 MIMO、256 QAM 调制以及 160 MHz 带宽也能达到相似的速率，但 11ad 仅需一个空间流、64 QAM 调制和单个信道就能实现相同速率目标。

I 大容量

- 毫米波的应用可以很大程度减少天线间尺寸，便于集成多个天线单元，在原有 2.4 GHz 频段天线面积上可以容纳 32 或更多的天线单元，大规模天线通过 Beamforming 技术实现高方向性通信，有效降低多个设备同时工作时的相互干扰，极大提升信道容量。

I 低时延

- 10 us 的往返时间成为可能，几乎可比于有线通信，满足时延要求敏感的应用如虚拟现实 (VR) 和增强现实 (AR)。

WiGig/802.11ad 技术支持广泛的应用，包括无线投影、高清视频分发、PC 无线扩展坞和无线 VR 头盔等。产业链上芯片商有像 Intel、高通和三星，终端设备典型的有 TP-Link Talon AD7200 路由器、戴尔 E7450/7470 笔记本等。

802.11ad 有着以上的优点，但 60 GHz 频段路损较大，衰减严重，决定了其无法穿墙或远距离传输，因此往往需要搭配 11n/ac 技术，组成无缝的三频 WLAN 产品。

802.11ad 技术原理

信道分配

802.11ad 工作于 60 GHz (57 GHz – 66 GHz) ISM 频段，该频段共定义了四个信道，每个信道带宽 2.16 GHz，但不是四个信道在世界各地都能适用，其中只有 2 号信道 (60.48 GHz) 全球通用，因为常被置为默认信道号。

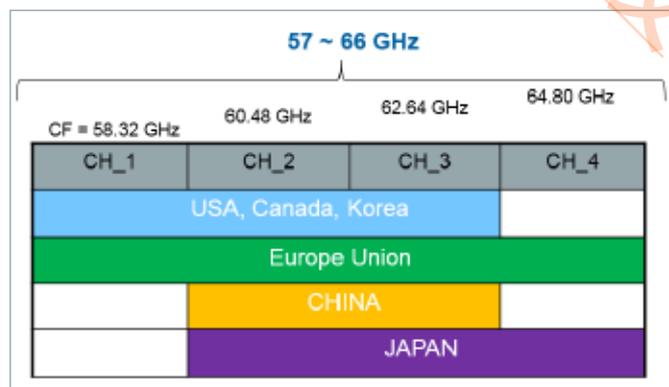


图 1 全球 WLAN 802.11ad 频率分配

物理层

802.11ad 共定义了四种物理层方式，以适应不同的使用环境，如低功耗单载波方式着眼于对功耗敏感的终端设备。11ad 设备不一定需要支持全部四种方式，这里只有控制物理层 (SC PHY) 和常规单载波调制 (SC PHY) 两种是强制要求，OFDM 和低功耗 SC 是可选方式，目前市场上商业芯片几乎都不支持 OFDM 方式，因此实际上最高速率是单载波调制 SC 工作在 MCS12 时的 4.6 Gbps。

| PHY | MCS | Modulation | IDEAL RAW BIT RATE |
|-----------------------------|---------|---|--------------------|
| Control PHY | 0 | $\pi/2$ DBPSK | 27.5 Mbps |
| Single carrier (SC) PHY | 1...12 | $\pi/2$ DBPSK $\pi/2$ QPSK $\pi/2$ 16-QAM | 385 ~ 4620 Mbps |
| OFDM PHY (optional) | 13...24 | OFDM-SQPSK OFDM-QPSK OFDM-16QAM OFDM-64QAM | 693 ~ 6756.75 Mbps |
| Low-Power SC PHY (optional) | 25...31 | $\pi/2$ DBPSK $\pi/2$ QPSK | 625.6 ~ 2503 Mbps |

表 1 WLAN 物理层

以上所有的物理层方式使用相同的帧结构，包括了 Preamble, Header, Data和TRN四部分。

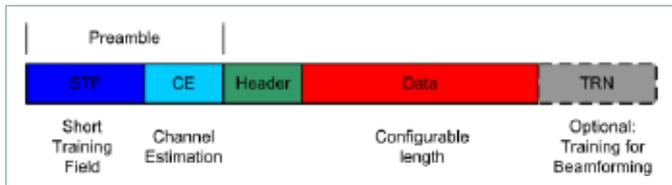


图2 802.11ad帧结构示意图

Preamble

前导包括了短训练信号和信道估计，存在于所有的物理层方式中，用于接收机识别包类型、频率误差估计，也能用于信道估计。

Header

每个物理层有不同的包头，包含发给接收设备的重要信息，例如调制编码方式，文件长度以及校验和。

Data

该部分用于传输编码调制后的真正用户数据

TRN

属于可选部分，可加入在任何包中，用于优化 Beamforming设置

测试需求

- 频谱发射模板 (Transmit Mask)
- 中心频率容差 (Center Frequency Tolerance)
- 符号定时误差 (Symbol clock tolerance)
- 本振泄露 (Transmit Center Frequency leakage)
- 突发的上升沿和下降沿时间 (Transmit Rampup and Rampdown)
- 不同MCS下EVM和灵敏度要求

研发测试方案

802.11ad设备包括了基带BB芯片和射频收发RFIC芯片，如高通的QCA6335基带芯片和QCA6310射频芯片组合。BB芯片因其频率相对较低，通常都能支持传导连接测试；RFIC芯片因毫米波频段特性限制，天线和RFIC利用 AIP (Antenna in Package) 技术封装在一起，以致只能通过OTA (Over The Air) 方式进行射频测试。

BBIC测试

BBIC是信号收发的基带物理层实现模块，包括了RX和TX两部分。

BBIC RX测试

R&S®SMW200A单表不但支持2 GHz带宽的模拟IQ输出，而且也能支持1X GHz中频信号输出，满足DUT的IQ或中频输入要求。SMW200A直接集成了WiGig/802.11ad信号产生功能，无需依托外部电脑即可实时生成信号。



图3 SMW200A实现BBIC接收测试

SMW200A的11ad信号产生界面支持对Control PHY/SC PHY, MCS, Code Rate, Header, FCS以及信道编码前原始数据等进行灵活设置，非常方便用于BBIC物理层接收验证或整机灵敏度测试。

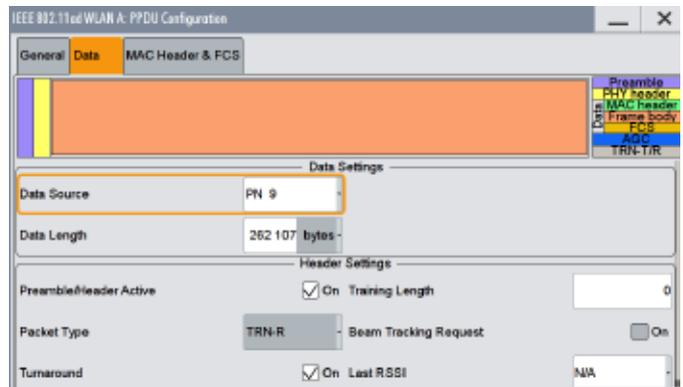
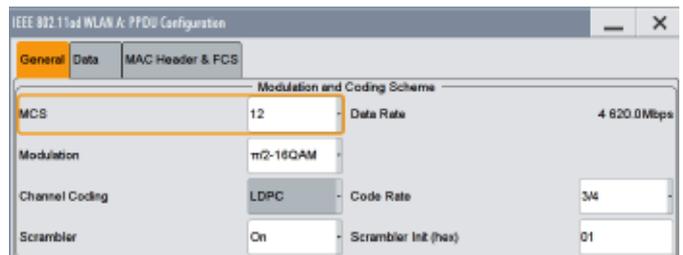


图4 SMW200A的11ad信号产生设置界面

BBIC TX测试

搭配4 GHz带宽高端示波器R&S RTO2044，频谱与信号分析仪R&S FSW67支持中频频率大于5.5 GHz的11ad信号解调；如果BBIC不是中频信号输出，而是单端或差分IQ输出，只需要两根或四根IQ线连接到示波器即可。

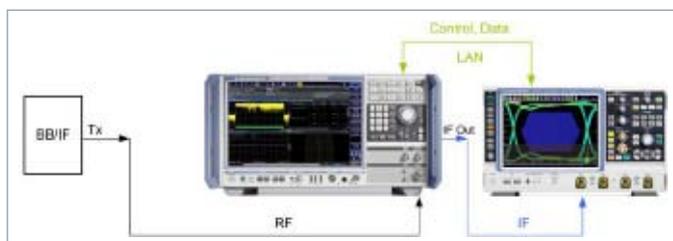


图5 FSW67 + RTO2044分析802.11ad中频信号

RFIC测试

RFIC实现了11ad信号的调制和解调，以及通过多路移相器产生和接收16路甚至多达256路的Beamforming信号，完成高指向性射频信号收发，补偿在60 GHz毫米波段传输带来的高路径损耗。

LO相噪测试

本振的相噪指标影响发射机的调制信号质量、邻信道泄露抑制制度，以及接收侧信号质量和误码率。由于无线高速数据传输离不开高阶调制，也就意味着对本振相噪指标有较高要求。但是，毫米波段器件相噪水平和我们熟悉的6 GHz以下频段相比却有较大差距，举例而言，如果把11ac使用的5.9 GHz本振进行10倍频得到60 GHz本振信号，相噪会随之恶化 $20\log(60/5.9)$ 约20 dB。因此，在毫米波段要实现无线传输，不仅考验设备的相噪水平，对测试测量仪表也是挑战。

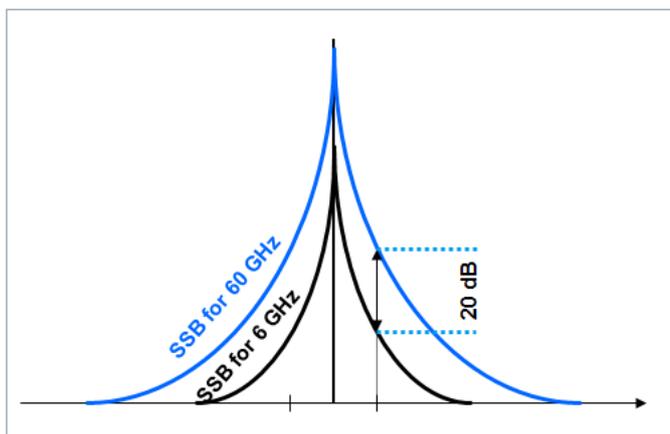


图6 频综10倍频后相噪变化曲线

R&S借助于自己研发的频综ASIC芯片，使高端频谱分析仪FSW67在60 GHz频率，10 kHz频偏处具备-112 dBc/Hz的相噪能力，在1 MHz频偏处更可达-128 dBc/Hz，满足于市面上各种60 GHz RFIC（如Hittite HMC6300 1 MHz频偏-93 dBc/Hz)的相噪测试需求，FSW67拥有足够的裕量保证相噪测量精度。

| R&S FSW-K40: Phase noise sensitivity (typical values) without noise correction | | | | | | | |
|---|---------------------------------------|-------|--------|-------|--------|---------|--------|
| Input level > 0 dBm, operating mode "averaged", with R&S FSW-B4 OCKO precision frequency reference option | | | | | | | |
| Input frequency | Frequency offset values in dBc (1 Hz) | | | | | | |
| | 1 Hz | 10 Hz | 100 Hz | 1 kHz | 10 kHz | 100 kHz | 1 MHz |
| 100 MHz | -90 | -110 | -125 | -137 | -143 | -144 | -150 |
| 500 MHz | -77 | -97 | -110 | -125 | -141 | -142 | -150.5 |
| 1 GHz | -71 | -91 | -112 | -120 | -138 | -140 | -149.5 |
| 2 GHz | -65 | -85 | -104 | -123 | -130 | -130 | -145 |
| 10 GHz | -51 | -71 | -94 | -117 | -128 | -129 | -144 |
| 25 GHz | -43 | -63 | -86 | -109 | -120 | -122 | -136 |
| 40 GHz | -39 | -59 | -82 | -105 | -116 | -118 | -130 |
| 50 GHz | -35 | -55 | -78 | -101 | -112 | -114 | -128 |

图7 频谱仪FSW67在60 GHz的相噪测量能力

噪声系数NF测试

噪声系数直接决定了接收机灵敏度能力，是射频研发阶段必不可少的一个测试环节。FSW67在60 GHz频段具备-155 dBm/Hz的典型底噪值，只需在FSW67频谱分析仪上选装噪声系数测量选件FSW-K30，再结合Noisecom公司的60 GHz噪声系数测试附件NC5115-60 G/GT，无需任何外部谐波下变频器就能非常方便地完成802.11ad接收机噪声系数测试，并且支持WR15波导口或者1.85 mm同轴口两种接口。

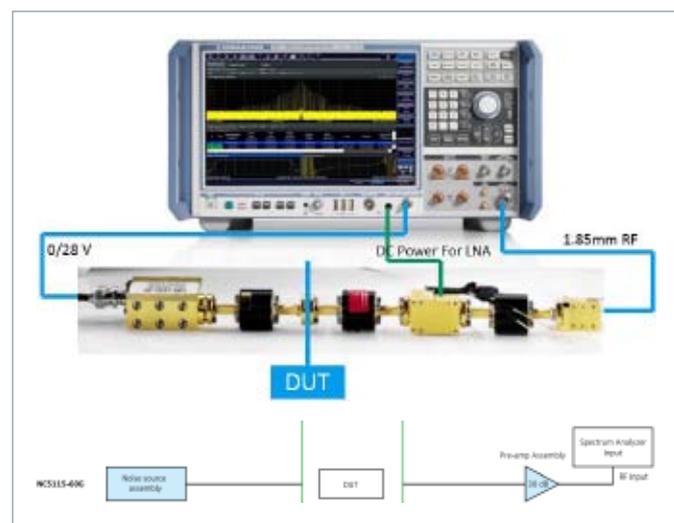


图8 FSW67的60 GHz噪声系数测试

图9是FSW67在测试一款Wireless HD/11ad低噪放的噪声系数，其中黄色曲线是噪声系数，结果都小于5 dB，另一条青色曲线表示低噪放增益。



图9 FSW67的60 GHz噪声系数界面

RFIC TX测试

SMW200A单表输出差分IQ或者中频IF信号作为RFIC TX测试的输入，再利用FSW67 + RTO对60 GHz毫米波信号完成2.3章节和发射机相关的测试项目。

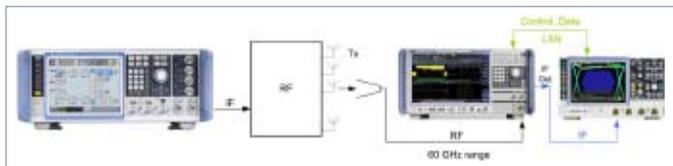


图10 RFIC TX部分测试框图

RFIC RX测试

为了能够产生60 GHz频段2 GHz带宽的11ad信号，需要一台具备2 GHz带宽的SMW200A，并搭配60 GHz专用的矢量上变频器SZU100A。SMW和SZU之间通过USB线+差分IQ线线束进行连接，一旦连接好后，SZU100A就是不可见的黑盒，信号产生所需的所有参数设置都在SMW界面上完成。SMW+SZU组合在输出MCS12 16QAM信号时具备高达-34 dBc的优异EVM值，保证了RFIC RX测试时射频输入端的信号质量。

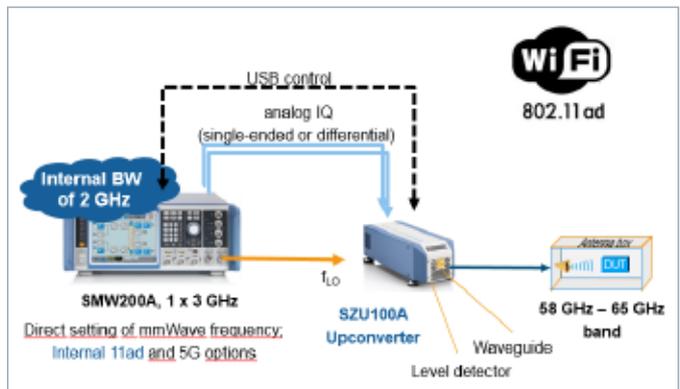


图11 SMW和SZU连接图

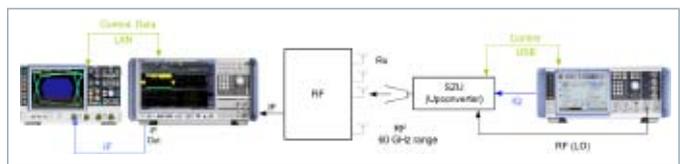


图12 RFIC的RX部分测试框图

终端整机测试

射频质量测试

对于11ad设备整机测试，发射和接收的射频指标要求如下，对于MCS12调制编码方式，要求发射机EVM优于-21 dBc，接收机灵敏度高于-53 dBm。

| PHY Type | MCS | EVM | Sensitivity |
|----------|-----|-----|-------------|
| Ctrl PHY | 0 | -6 | -78 |
| | 1 | -6 | -88 |
| | 2 | -7 | -86 |
| | 3 | -9 | -84 |
| | 4 | -10 | -84 |
| SC PHY | 5 | -12 | -82 |
| | 6 | -11 | -83 |
| | 7 | -12 | -82 |
| | 8 | -13 | -81 |
| | 9 | -15 | -80 |
| | 10 | -19 | -85 |
| | 11 | -20 | -84 |
| | 12 | -21 | -83 |

表2 不同MCS的EVM和灵敏度要求

SMW+SZU组合不仅输出信号质量优异，而且具备100 dB的大动态范围，典型功率范围 [-90, +10] dBm，精度保证值可达2 dB，非常适合各种MCS等级下的接收灵敏度测试。RX测试连接图如

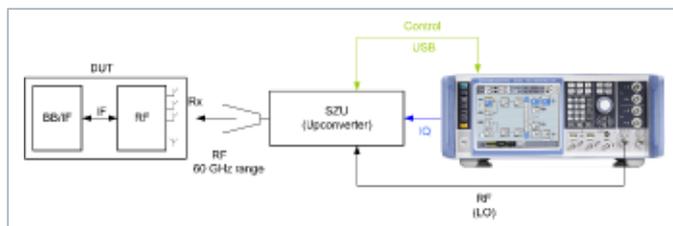


图13 终端接收指标测试

整机TX测试同RFIC的TX测试，可参考3.2.3章节，这里不再累述。

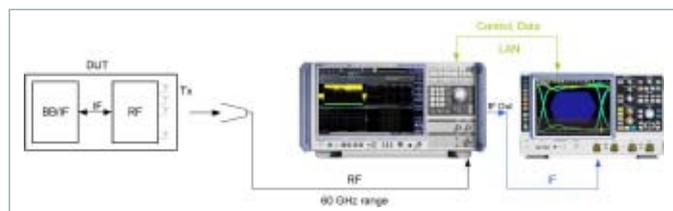


图14 设备发射指标测试

有源天线OTA测试

不同于2.4/5 G频段的WLAN设备，毫米波设备的天线和收发信机两者封装在一起形成天线模块，无法提供射频接口进行传导连接测试，因此OTA测试是毫米波芯片或终端测试的唯一方案。

R&S提供11ad有源天线一站式测试解决方案，包括了尺寸灵活可定制的暗室R&S®ATS1000，天线分析软件R&S®AMS32，以及配套的测量仪表（SMW/SZU/FSW67/ZVA67等），该方案优势包括：

- 灵活的测试配置场景：一、超高精度的转台方案，二、多探头方案
- 快速且准确的天线测试能力
- 有源天线TRP, EIRP, TIS, EiS, EVM等测试
- AMS32软件实现近场NF到远场FF转换
- 独创的螺旋扫描(双坐标轴转换)法，获得超快的测量速度

图14是暗室ATS1000两种OTA测试使用场景，左侧是转台加摇臂扫描方案，右侧是多探头方案。

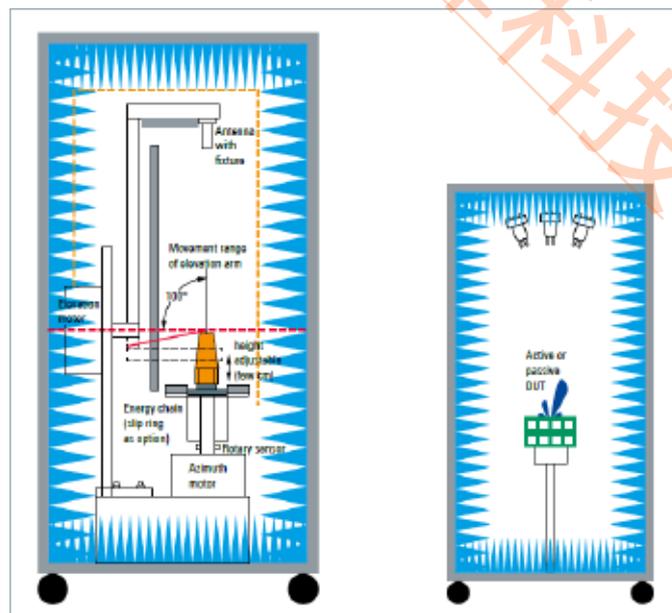


图15 暗室ATS1000的两种OTA测试场景

总结

随着越来越多的手机终端/路由器/平板电脑/VR头盔加入了802.11ad技术，毫米波高带宽和OTA等测试要求对芯片研发、设备研发以及生产测试环节带来了新的挑战，罗德与施瓦茨公司提供研发和生产两套解决方案，助力802.11ad芯片和设备的开发与测试。

订购信息

| 信号源SMW200A | | |
|---|----------|--------------|
| 描述 | 选件名 | 货号 |
| Wideband Baseband Generator with ARB (256 Msample), 500 MHz RF bandwidth | B9 | 1413.7350.02 |
| Wideband Baseband Main Module, two I/Q paths to RF | B13XT | 1413.8005.02 |
| 100 kHz to 6 GHz | B106 | 1413.0104.02 |
| 100 kHz to 20 GHz | B120 | 1413.0404.02 |
| Enhanced Phase Noise Performance and FM/ϕ M Modulator | SMW-B22 | 1413.2207.02 |
| Baseband Extension to 1 GHz RF bandwidth | SMW-K525 | 1414.6129.02 |
| Baseband Extension to 2 GHz RF bandwidth | SMW-K527 | 1414.6158.02 |
| Wideband differential analog I/Q outputs | SMW-K17 | 1414.2346.02 |
| IEEE 802.11ad | SMW-K141 | 1414.1333.02 |

| 11ad专用矢量上变频器SZU100A | | |
|--|-----------|--------------|
| 描述 | 选件名 | 货号 |
| IQ Upconverter, base unit, (including combined differential IQ/USB cable) | SZU100A | 1425.3003.02 |
| Frequency Option 57 GHz to 66 GHz, WR15 | SZU-B1066 | 1425.3110.02 |
| Waveguide-coax-adapter WR15-1.85 mm | | 1324.0600.00 |

| 频谱仪FSW, 2 Hz ~ 67 GHz | | |
|---------------------------------------|--------------------|--------------|
| 描述 | 选件名 | 货号 |
| OCXO Precision Frequency Reference | FSW-B4 | 1313.0703.02 |
| RF Preamplifier, 100 kHz to 67 GHz | FSW-B24 | 1313.0832.66 |
| LO/IF Connections for external mixers | FSW-B21(optional) | 1313.1100.43 |
| 160 MHz Analysis Bandwidth | FSW-B160(optional) | 1325.4850.04 |
| 2 GHz Analysis Bandwidth | FSW-B2000 | 1325.4750.02 |
| WLAN 802.11ad Measurements | FSW-K95 | 1313.1639.02 |

| 示波器RTO2044 | | |
|---|----------|--------------|
| 描述 | 选件名 | 货号 |
| 4 GHz, 20 Gsample/s, 50/200 Msample, 4 channels | RTO2044 | 1329.7002.44 |
| OCXO 10 MHz | RTO-B4 | 1304.8305.02 |
| Memory Upgrade, 100 Msample per channel | RTO-B101 | 1329.7060.02 |
| Memory Upgrade, 200 Msample per channel | RTO-B102 | 1329.7077.02 |
| Memory Upgrade, 400 Msample per channel | RTO-B104 | 1329.7083.02 |

二 Blue Tooth BR/EDR/LTE/5.0 测试平台

储存不够时，冰箱自动订购食物；需要维护保养时，汽车自动通知修理厂；前方交通事故或者堵车时，汽车自己上报当前交通状态；心脏起搏器提前警告健康状况，并自动发送给医生。在未来，大量的电子设备会连接到互联网中，这也就是人们常说的物联网时代。物联网的热潮下，无线通信技术会得到更大规模的应用，蓝牙技术就是其中的一个重要成员。

作为当前最热门的通信技术之一，蓝牙技术已经普遍应用于智能手机，电脑，汽车，无线音响，健康手环等电子设备，受到了人们越来越多的关注。据蓝牙组织统计，目前有不少于80亿蓝牙设备，在未来，物联网高速发展中，蓝牙设备的数量会越来越庞大。

为了保证无线产品的质量，射频测试是至关重要的一个环节，本文首先对蓝牙技术进行简单的介绍，其次，针对蓝牙低功耗技术的射频测试，给出相应的射频测试方案。

蓝牙低功耗技术简介

在上世纪90年代，为了减少通信间的线缆连接，蓝牙技术得以初步发展，最初的传输距离只有10米左右，传输速率也只有最基础的1Mbps。在随后的数年间，蓝牙也在不停的更新发展，具体包括：跳频技术，更快的传输速率，更低的功耗。在2010年，蓝牙技术有了两个分支，传统蓝牙和低功耗蓝牙。蓝牙3.0之前的版本，我们称为传统蓝牙，被用于一些语音业务和数传业务，比如蓝牙耳机、智能蓝牙音响和打印机等。从蓝牙4.0后，称为低功耗蓝牙，目前最新的版本是蓝牙5，主要应用于一些对功耗要求较高的电子设备，一个纽扣电池就能支持运行很长时间，如健康手环，智能穿戴设备等，在芯片的复杂性上也进行了简化，所以成本也得到进一步的降低。

传统蓝牙设备在频繁连接和断开时，需要进行频繁的重复配对，所以功耗无法得到最大程度的优化。相比传统蓝牙，低功耗蓝牙成功地解决了这些问题，而这也是低功耗蓝牙技术能够得到广泛应用的原因。

低功耗蓝牙引入了3个广告信道，如图1所示，红色区域为广告信道，蓝色信道为常用的传输信道，广告信道分布在WLAN常用信道的边缘区域，避免来自WLAN信号的同频干扰。

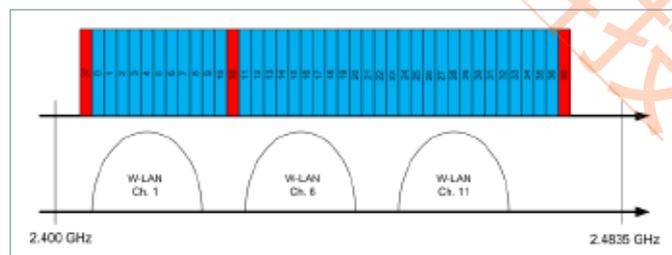


图1：蓝牙低功耗的信道分布

在低功耗蓝牙设备之间需要建立连接时，设备只需要监听3个信道，而传统蓝牙设备则需要监听32个信道，所以，理论的响应时间要快10倍以上。在进行少量信息传输时，低功耗蓝牙设备之间无需配对连接，可以直接在广告信道上完成传送。

DTM下的射频测试

DTM全称为direct test mode，是蓝牙规范要求的一种测试连接方式，用于控制蓝牙被测设备，形式上分两种：1、基于HCI的USB连接；2、基于双绞线的UART接口。被测设备可以采用其中任意一种连接方式。图2为DTM下的框架图。

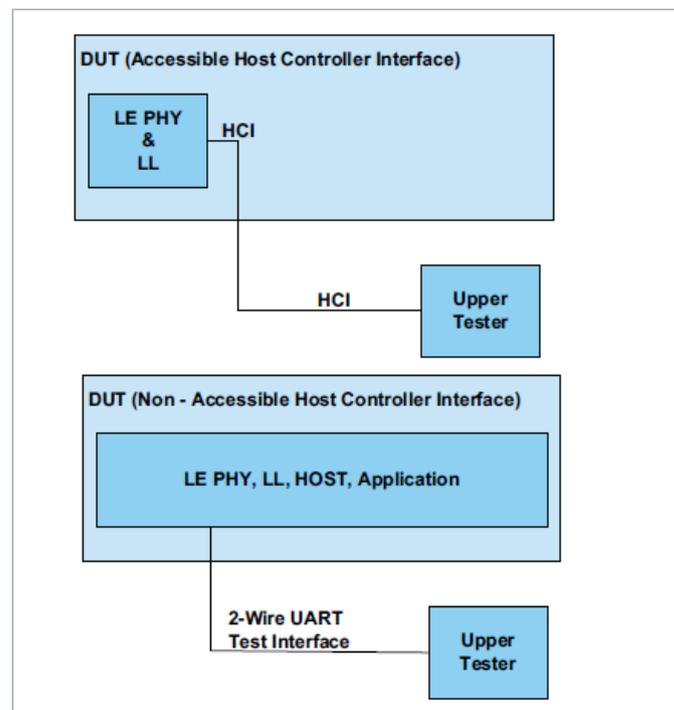


图2：direct test mode架构图

图3中测试仪表为罗德与施瓦茨公司的综合测试仪CMW500，通过仪表上的USB插口，与被测蓝牙设备连接通信，进行DTM下的射频测试。



图3：无线综测仪CMW500

图4中，低功耗蓝牙设备可以通过USB或者串口线与仪表进行连接，仪表会给低功耗蓝牙设备发送规范要求的指令，进行射频性能测试。

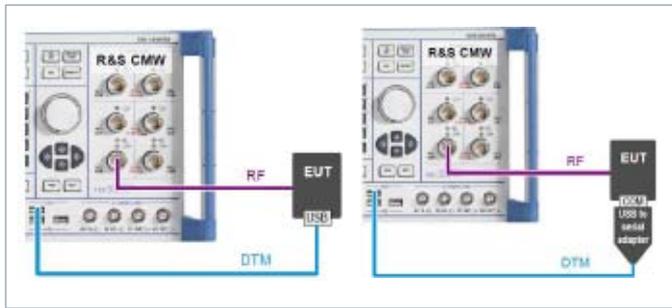


图4：低功耗蓝牙设备与测试仪表的连接图

由于是蓝牙规范要求的测试连接方式，使用该方法可以测试蓝牙规范要求的所有测试项目。

广告模式下的射频测试

市场上的一些低功耗蓝牙设备，在产品制作完成后，并不支持DTM连接，比如有些智能手环。所以，测试仪表CMW也提供另一种测试方法，广告模式下的射频测试。在正常工作模式下，低功耗蓝牙设备在3个广告信道上发射和侦听信号，这3个频率分布在高、中、低频率，使用仪表进行侦听和响应，可以分别在这3个频率上进行。

使用该方法，所有低功耗蓝牙产品都可以直接进行测试，无需额外的产品配置和线缆连接。由于该方法不是蓝牙规范要求的方法，相对于DTM下的测试，测试的项目较少，所以，该模式不能作为认证的测试，可用于产品的生产测试、质量检测以及整机性能的测试。

结束语

无线通信技术的高速发展，使得无线产品竞争越来越激烈，低功耗蓝牙的诸多优势，为小型的无线产品设计者创造了更优的环境，凭着相对较低的设计成本，更多创新的蓝牙产品即将进入物联网这个大市场。为了生产性能更好的产品，围绕产品的射频测试将越来越重要，也是适应未来竞争的制胜法宝。

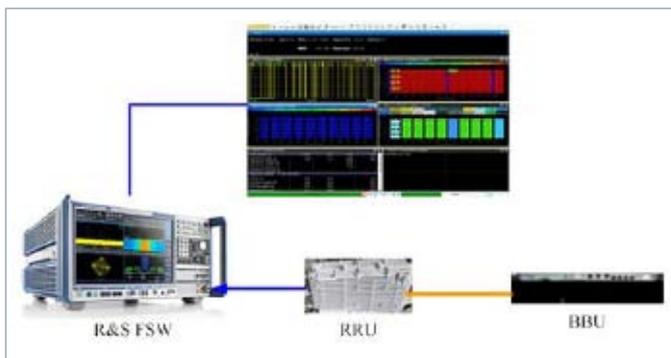
三 NB IoT和eMTC测试平台

NB-IoT基站测试解决方案

在通信网络的部署当中，测试仪器对于网络性能的验证至关重要。R&S公司一直走在NB-IoT测试验证的最前沿，在2016年6月NB-IoT标准冻结之日，R&S公司测试仪表的NB-IoT功能也正式发布。2016年底，与三大运营商和几大设备厂商（包括中兴、华为、爱立信、大唐等）之间就已经完成了NB-IoT基站的摸底测试。

基站实验室测试方案

罗德与施瓦茨是第一个提供NB-IoT基站测试方案的供应商，基于R&S测试仪表，可以产生与分析NB-IoT信号。NB-IoT测试方案基于完美的测试设备组合，由矢量信号发生器SMW200A和信号与频谱分析仪FSW组成，这两款仪表已经广泛应用于移动网络设备生产厂商的基站测试中。



R&S®SMW200A，可以通过单台仪表完成NB-IoT的接收机测试，尤其是针对邻道选择性、阻塞、动态范围等指标的测试，不需要另外的信号源。同时，由于R&S SMW200A内置信道衰落和高斯白噪声模块，对于衰落场景下的接收机性能测试，可以很容易的通过R&S SMW200A单台仪表实现。

基站外场测试方案

为了保证NB-IoT网络运行的质量，R&S公司提供专业的路测和网优测试解决方案。该方案由扫频仪与ROMES路测软件组成，在中国移动，中国联通和中国电信的实际网络部署中，都有广泛采用。

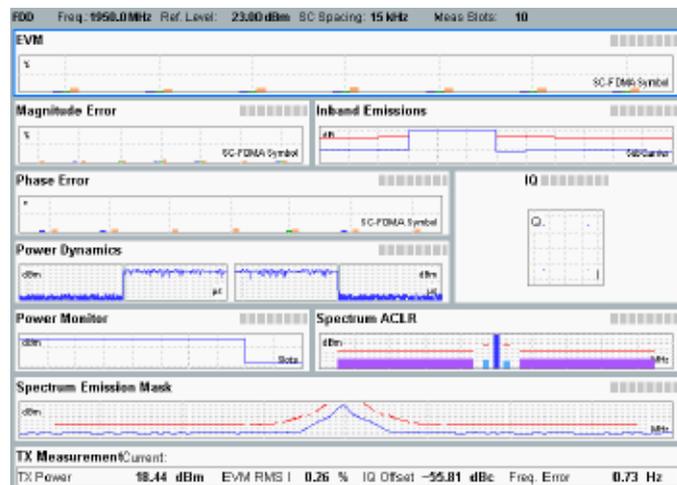
针对外场的基站维护，R&S也提供了专业的测试方案。手持式频谱分析仪FSH可以对各种蜂窝信号进行解调，并且具备干扰查找和地图定位功能；天馈线测试仪ZVH可用于天馈线故障定位、器件测试等需求。

NB-IoT终端测试解决方案

从NB-IoT产业链来看，终端的发展与系统设备的发展是相辅相成的。为了满足NB-IoT芯片及终端的产业发展需求，R&S公司提供了完整的测试解决方案，覆盖射频、协议、数据测试等方面，并应用到芯片研发、生产、认证和服务等各个阶段。

NB-IoT终端研发和生产射频测试方案

针对NB-IoT终端芯片研发阶段的射频测试，可以采用FSW和SMW200A的方案，这套信号源和频谱仪的组合，拥有最佳的性能和极高的灵活性，方便研发人员进行芯片算法分析验证和射频性能调试。R&S无线综测仪CMW500对于NB-IoT同时提供信令和非信令两种测试方案，涵盖了3GPP规范的各个测试项目。CMW500除了支持NB-IoT以外，还可以支持传统的2G/3G/4G移动通讯技术和WLAN、WiMAX，Bluetooth等非蜂窝技术，从而用一台仪器可以测试具备多种无线技术的终端。基于CMW500，R&S开发了CMWRun软件来进行NB-IoT的自动化测试，帮助研发和测试工程师提高测试效率。



CMW500

蜂窝物联网协议测试 – R&S CMW500



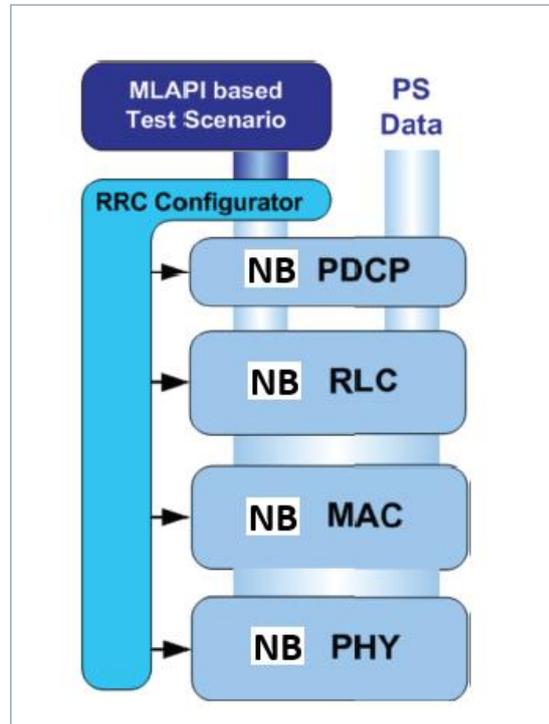
随着通信技术的快速发展，网络之间的互联互通以及通信业务越来越依赖通信协议的发展。可以说，通信系统的正常运行和通信业务的顺利开展，首先就是取决于协议软件是否满足协议规范的要求，所以必须进行协议测试加以保证。协议测试的目的就是保证通信协议正确实现以及确保不同的通信设备之间可以互通互联。在通信测试中，协议测试仅仅是一种黑盒测试，它并不检查协议代码，而是按照协议标准，通过控制观察被测协议实现的外部行为对其进行评价。

在无线终端测试的各个阶段，从早期的研发测试到最后的一致性验证测试以及运营商定制测试，对协议栈的验证都具有非常重要的作用。R&S公司的CMW500无线终端信令测试仪，可以模拟目前主流的GSM/WCDMA/LTE及蜂窝物联网(包括NB-IoT及eMTC)等各种无线通信技术基站，并对无线终端的协议栈进行详尽的测试。

使用MLAPI实现C-IoT协议研发测试

针对NB-IoT/eMTC的协议研发测试需求，CMW500协议测试仪提供了MLAPI (Medium-Layer API) 编程接口，用于测试被测终端的信令流程。

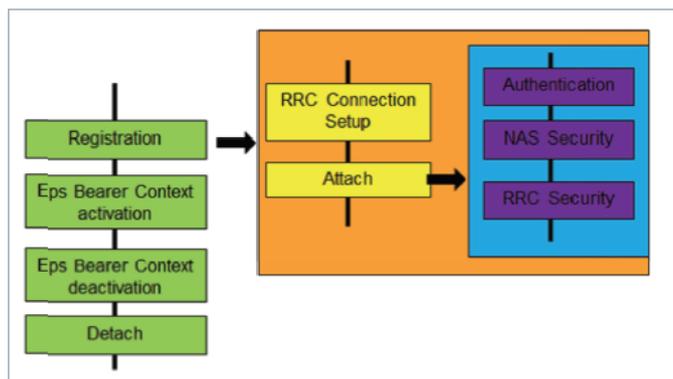
MLAPI测试场景利用CMW500中RRC层的一个服务接入点来进行信令测试，如下图所示，这个接入点主要进行空口端到端消息的传输交换。RRC配置器自动配置底层的协议层，并且保证在NB-IoT/eMTC被测终端和网络侧之间交互信令消息的一致性。



RRC配置器可以确保协议栈的一致性配置，并且也可以评估MLAPI测试场景和UE之间交互的消息。MLAPI测试场景只是包含了RRC/NAS层消息的发送和回应，而协议栈中的RRC配置器，控制并且配置了底层协议栈。R&S公司的CMWcomposer消息编辑器可以方便地进行RRC/NAS层消息内容的编辑，并可以保持消息本身和协议栈配置之间的一致性。由于协议消息内容保存为xml文件格式，它在MLAPI测试场景运行时才载入使用，所以对消息进行配置修改后，不需要进行编译就可以使用。只要测试场景的动态回应不变，也就是保持不同消息类型的序列不变，那么就可以创建新的测试场景，而不需要修改C++的源代码。这使得新用户使用MLAPI进行测试变得很容易，甚至不需要任何C++的知识。

为了简化RRC/NAS层信令场景的产生，CMW500提供了一个C++的类库，以及一些NB-IoT/eMTC测试场景的例子。C++类库中包含了RRC和NAS协议流程中状态机类需要的模块。下图图示了一个测试流程可以通过调用四个MLAPI的状态机来实现：UE注册，激活和去激活一个PDP数据连接，以及最后发起一个去附着流程。其中注册流程分为RRC Connection setup和Attach两个流程；Attach流程又分为

Authentication、NAS/RRC Security三个子流程。MLAPI状态机使用模块化的方式来构建，也就是说，在多个MLAPI状态机中使用的公共流程可以封装成单独的状态机。



由于可以把复杂的信令测试分解成不同模块，而且不需要重新编写所有的流程模块，因此使用MLAPI可以很快地实现复杂的信令测试，这对于MLAPI用户来说是很有益的。而且MLAPI还具有下面一些优点：面向对象的编程可以确保C++源代码的结构很清晰；所有状态机都提供源代码，高级用户可以使用这些状态机作为他们自定义的状态机中的基本类；MLAPI状态机和协议消息都以XML文件格式提供。

用CMWCards实现C-IoT协议研发测试

无线通信终端设备的开发必须进行日益复杂的测试，要编写各种测试用例，必须熟悉3GPP定义的协议流程，同时还需要懂得编程的技巧，必须依赖程序设计及通讯协议的专家方能完成。如今，通信技术发展日新月异，通信行业的竞争也日愈激烈，很多运营商都有自己特有的测试需求和测试用例，对于芯片和终端厂商来说，如何快速、有效地编写测试用例就显得尤为重要。

R&S公司基于MLAPI已经开发并发布了一系列协议测试用例包。由于可以通过CMWcomposer修改任意的信令消息，并且可以通过修改C++源代码来实现任意的信令流程，所以，可以满足用户所有的协议测试用例的需求。但是，由于使用该方案要求用户对代码的编程和3GPP的协议规范都比较熟悉，对于用户来说显得比较复杂，开发测试用例的效率比较低。而用户关心的是某个具体的测试用例，产品是否符合规范，是否可以在现有的网络使用进行验证，而不是花很多的时间去学习如何编程和研究3GPP的很多规范。

基于该考虑，R&S公司在CMW500协议测试仪平台提供图形化界面编辑测试用例的软件用户接口CMWcards。使用该接口，开发人员不需要具备程序开发的经验。CMWcards接口就如同纸牌游戏般简单，通过简易的规则，用户即可建立功能性测试及减少实际网络联机问题。

CMWcards提供相当广泛的GSM/WCDMA/LTE/NB-IoT/eMTC测试功能卡片，用户可以使用卡片拖放进行测试脚本的编辑及参数进行修改，进而编写出所需的测试用例。CMWcards提供种类多样化的卡片，其中包括了程序设定、人机接口等，并可通过颜色定义来确保所建立的测试序列是实用的也是可用的；CMWcards提供GUI界面，详尽地说明3GPP规范中的各种终端设备状态，并仅显示待测物所需的协议状态卡片，当用户创建完成测试脚本，即可在CMW500执行所需的测试项目。下图是使用CMWcards工具创建并编辑协议测试用例的示意图。



C-IoT协议一致性测试

协议一致性测试的定义是：“一个一致性的实现应满足静态一致性需求和动态一致性需求，并与协议实现一致性声明（Protocol Implementation Conformance Statements, PICS）中所声明的功能相符合。”一致性测试主要是确定被测终端是否与标准规定一致。通常利用一组测试用例，在一定的网络环境下，对被测终端进行黑盒测试，通过比较DUT的实际输出与预期输出的异同，判定DUT是否与协议描述相一致。

一致性测试只关心协议实现呈现于外部的性能。对于手机行业来说，我们知道现在世界上很多手机的品牌，也有众多的移动通信网络设备的制造商，他们所生产出来的手机和网络设备被销往全球的不同地方，因此为了能保证不同厂商的手机和不同的网络设备之间能正常工作，通过一致性测试会提高人们对不同设备符合相应协议标准的置信程度，提高相同标准不同实现之间互连的概率。

在理想的情况下，不同手机厂商按相同协议标准生产出来的手机本应在不同网络设备厂商的网络环境下正常通信。但是实际情况并非如此，由于设计者对标准的不同理解，导致手机的某些性能要么偏离标准，要么是标准的一个子集。这些不同程度与标准不一致的手机将不能正常工作，因此需用统一的尺度来衡量手机的一致性，从而保证不同的手机之间，不同的手机和网络之间可以正常通讯。

因此，协议一致性测试是众多运营商强制要求的测试内容。

作为终端厂家或者是手机芯片厂家，为了更好地验证终端的协议一致性要求，一致性测试一个非常重要的必不可少的环节。

NB-IoT/eMTC的协议一致性测试用例的定义，均来自于3GPP TS36.523-1。R&S公司的协议一致性测试系统CMW500满足NB-IoT/eMTC的协议一致性测试，并被GCF/PTCRB两大认证组织认可。在GCF/PTCRB中，R&S CMW500协议一致性测试平台的编号都是92，可以覆盖GSM/WCDMA/LTE/NB-IoT/eMTC的所有协议一致性测试用例。

C-IoT协议运营商定制测试

运营商定制的协议测试，通常用于运营商的选型测试中，一般是运营商根据自己的网络铺设特点，制定的一系列测试用例，一般可以认为是一致性测试的一个补充。

针对NB-IoT，R&S基于CMW500提供对于中国移动、中国电信、TMO-US、Dish等运营商的定制测试用例。

针对eMTC，R&S基于CMW500提供对于AT&T、VZW等运营商的定制测试用例。

C-IoT协议测试的订购信息

| 产品型号 | 主要特性 | 备注 |
|---------------------|---|----|
| 协议测试仪 R&S CMW500 | CMW-PS505, PK364, B500I*2, B450H, S570B, B570B*3, S590D, B590D CMW-KP030, KR313, MLAPI: KU300, KU301, KU302, KU314, KU503 CMWcards: KT022, KT026, KX340, KX341 PCT: KK300, KK305, NetOp: KO350, KY390, KX530~KX532, KX545~KX549, KY570, KAO76, KAO10, | |

蜂窝物联网射频一致性测试 – R&S®CMW-IoT及TS8980

C-IoT射频一致性测试

3GPP 不仅定义了NB-IoT/eMTC系统和终端的核心规范，而且还定义NB-IoT/eMTC终端一致性测试规范，其中终端射频一致性测试标准是36.521-1。测试内容主要包括：终端的发射机特性、接收机特性和性能需求等射频指标。

针对NB-IoT/eMTC的射频一致性测试，R&S提供两种GCF/PTCRB认可的方案：

- TS8980FTA-3系统。该系统可以覆盖GSM/WCDMA/LTE/NB-IoT/eMTC的所有射频一致性测试用例。系统中的主要仪表包括：CMW500协议测试仪；FSW26频谱仪；SMW200A信号源；NRP33S功率计；SSCU3A/SSCU3B；CS-RUB6时钟源；PC用于运行CONTEST软件控制整个系统。
- CMW-IoT系统。考虑到C-IoT产品的低成本性，R&S针对C-IoT产品的认证需求，推出了CMW-IoT紧凑型方案。该系统由一台CMW500协议测试仪与一台PC组成，可以覆盖NB-IoT/eMTC的大部分用例。对于一些发射机/接收机频段外的测试用例以及一些需要使用信号源的接收机相关测试用例，则需要使用TS8980FTA-3系统进行测试。



针对NB-IoT/eMTC的射频一致性测试，R&S的TS8980FTA-3及CMW-IoT系统都是GCF/PTCRB认可的一致性认证测试平台，平台号为98。

C-IoT射频一致性测试系统订购信息

TS8980FTA-3测试系统订购信息:

| 产品型号 | 主要特性 | 备注 |
|-------------------|--|----|
| 协议测试仪 CMW500 | CMW-PS505, PK364, B500I*2, B450H, S570B, B570B*3, S590D, B590D CMW-KP030, KR313, | |
| 频谱仪 FSW26 | FSW-B3, B8, B28 | |
| 信号源 SMW200A | SMW-B10*2, B14*2, B13T, B81, B106, B220 SMW-K55, K62 | |
| 功率计 NRP33S | | |
| 射频通道 SSCU3A/3B | | |
| 时钟源 CS-RUB6 | | |
| 主控机 PC | TS8-KT100, KT140 TS8-KL442~KL446 | |

CMW-IoT系统订购信息:

| 产品型号 | 主要特性 | 备注 |
|-----------------|--|----|
| 协议测试仪 CMW500 | CMW-PS505, PK364, B500I*2, B450H, S570B, B570B*3, S590D, B590D CMW-KP030, KR313, | |
| 主控机 PC | TS8-KT100, KT140 TS8-KL442, KL444, KL446 | |

蜂窝物联网RRM一致性测试 – R&S CMW-IoT

C-IoT RRM一致性测试

3GPP 36.521-3定义了NB-IoT/eMTC终端RRM (Radio Resource Management, 无线资源管理) 的测试标准, 测试无线终端的无线资源管理的性能。

NB-IoT的测试内容主要包括: 小区重选; RRC重建; Timing精度测试; Timing调整测试; 无线链路失败监测等; eMTC的测试内容主要包括: 小区选择/重选; 小区切换; RRC重建及随机接入竞争解决; Timing精度测试; Timing调整测试; 无线链路失败监测; 测量报告上报; RSRP上报等。

R&S®CMW-IoT系统用于NB-IoT/eMTC的RRM一致性测试, 是GCF/PTCRB认可的测试平台, 平台号为96。系统由一台CMW500协议测试仪与一台PC组成。可以覆盖NB-IoT/eMTC的所有RRM一致性用例。

C-IoT RRM一致性测试系统订购信息

| 产品型号 | 主要特性 | 备注 |
|-----------------|---|----|
| 协议测试仪 CMW500 | CMW-PS505, PK364, B500I*2, B450H, S570B, B570B*3, S590D, B590D CMW-KP030, KR313, KK042, KK047, KK030 | |
| 主控机 PC | TS8-KT100, KT140 | |

蜂窝物联网数据性能测试 – R&S TS-PQA

C-IoT数据性能测试

NB-IoT/eMTC作为两种物联网接入技术, 虽然速率比传统的WCDMA/LTE低很多, 但是终端的数据性能同样不可忽视。针对无线终端的数据性能测试, R&S®TS-PQA (Performance & Quality Analysis, 性能质量分析) 系统可以模拟真实使用场景包括各种信道场景状态下, 无线终端所能获得的数据性能。针对NB-IoT/eMTC, TS-PQA可以覆盖中国移动、中国电信、AT&T、TMO-US、GSMA等运营商及组织的测试需求。

C-IoT 数据性能测试系统TS-PQA的订购信息

| 产品型号 | 主要特性 | 备注 |
|-----------------|---|----|
| 协议测试仪 CMW500 | CMW-PS505, PK364, B500I*2, B450H, S570B, B570B*3, S590D, B590D CMW-KP030, KR313 | |
| 主控机 PC | TS8-KT100, KT140 PQA-KM923, KM924, KM853, KM235, KM735, KM130 | |

NB-IoT终端耗电测试方案

对于NB-IoT来说，功耗测试相比于以往的2G/3G/4G技术，显得更为重要。而如何准确评估NB-IoT终端的耗电性能也成为一个难题。R&S基于其无线综测仪CMW500、专门的功耗采集单元RT-ZVC和CMWRUN自动化软件平台，针对运营商的测试需求开发专门的测试用例，从而为客户提供了一个全面和经济的功耗性能测试解决方案。

NB-IoT终端定位测试方案

定位业务作为NB-IoT的一项补充功能，也得到了中国移动等运营商的关注，目前R&S公司正在和运营商一起讨论，制定相应的测试规范来覆盖基于NB-IoT的终端定位测试。

订购信息**CMW500典型配置：**

| Option | Order No. | Description |
|-----------|--------------|--|
| CMW-PS505 | 1208.8921.06 | R&S®CMW500 Basic Assembly (Mainframe), 70MHz to 3.3GHz |
| CMW-S100A | 1202.4701.02 | Baseband Measurement Unit with 1GByte digitizer memory |
| CMW-S550N | 1202.4801.15 | Baseband interconnection, flexible link |
| CMW-S570B | 1202.5008.03 | First RF Converter (TRX) |
| CMW-S052S | 1202.4201.20 | Solid State Drive (SSD) |
| CMW-S590A | 1202.5108.03 | RF Frontend, advanced functionality |
| CMW-S600B | 1201.0102.03 | CMW500 front panel with display/keypad |
| CMW-B690A | 1202.5908.02 | OCXO, high stability |
| CMW-B500I | 1208.7954.10 | Signaling Unit Advanced (SUA) for GSM, WCDMA, LTE, WLAN, NBIOT |
| CMW-B660H | 1202.7000.09 | Option Carrier, retrofittable in R&S Service, |
| CMW-B661H | 1202.7100.09 | Ethernet switch, retrofittable in R&S Service, |
| CMW-KS300 | 1211.1160.02 | NB-IOT Release 13 signaling, network emulation |
| CMW-KM300 | 1211.1182.02 | NB-IOT release 13 TX measurement, uplink |
| CMW-KW300 | 1211.0686.02 | NB-IOT release 13 waveforms for ARB generator |
| CMW-KT051 | 1203.4157.02 | General purpose, CMWrun sequencer software tool (software license) |
| CMW-KT052 | 1211.1682.02 | C-IOT, CMWrun sequencer software tool including eMTC and NB-IoT |

RTZVC04A典型配置

| Option | Order No. | Description |
|----------------|--------------|---|
| R&S® RT-ZVC04A | 1326.0259.34 | Multi-channel power probe, 4 current- and 4 voltage channels 5 MSa/s sampling rate, 18 bit resolution autoranging, version for R&S®CMWrun |

CMW100典型配置

| Option | Order No. | Description |
|-------------|--------------|---|
| CMW100 | 1201.0002K03 | Communications Manufacturing Test Set |
| CMW-S10C | 1210.7006.04 | CMW100 Compact Radio Test Head H10A (sel.) |
| CMA-Z053A | 1173.6058.00 | External power supply, AC 100V to 240V, DC 24V (acc.) |
| CMW100-Z053 | 1210.7870.02 | DC cable "Y" for power supply CMA-Z53A (acc.) |
| CMW100-Z12 | 1204.7208.04 | USB 3.0 cable for CMW100, lenght 1,8m (acc.) |
| CMW-PK461 | 1210.7129.02 | CMW100, extended frequency range, 4 to 6 GHz (SL) |
| CMW-PKV191 | 1210.7306.03 | CMW100, waveforms for ARB generator (SL) |
| CMW-KM300 | 1211.1182.02 | NB-IOT release 13 TX measurement, uplink |

四 LORA测试平台

“LoRa”是英文长距离的缩写（Long Range），也特指低功耗广域物联网通信技术中的一种，该技术方案由美国Semtech公司采用和推广，是基于扩频技术的超远距离无线传输技术。该技术标准在全球免费频段运行，由于极低的功率消耗，使其成为物联网数据传输的理想方案，可运用在工业、物流、环保技术、智能农业、智能城市、智能家居等众多领域。

设备在接入LoRa网络之前，必须根据各国无线通信标准进行测试。本文为开发和生产设备的人员和公司展示了，如何使用罗德与施瓦茨公司的测量设备进行LoRa射频收发信机测量。

技术背景及产品简介

LoRa技术基础

LoRa设备功耗极低同时具备在低速率传输条件下高达15 KM的无线覆盖范围，使用Chirp扩频（线性调频扩频）的调制技术。顾名思义，该调制技术的基础是Chirp（线性调频信号），在此基础上进行扩频调制，由于Chirp也是频率调制的一种，它保持了类似FSK的低功耗特性，在同样的功率消耗下，明显地增加了通信距离，同时还具有良好的鲁棒性和抗多普勒频移的能力。目前该调制方式已经被纳入IEEE标准802.15.4a的物理层规范中。

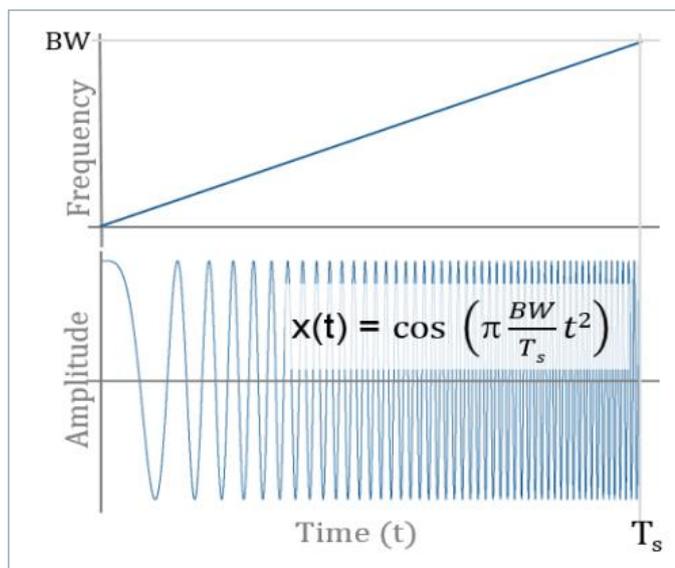


图1 一个线性调频脉冲内上升斜率信号示意

在实际的LoRa信号传输过程中，每个图1中的脉冲代表一个传输符号，许多个按时间顺序排列的上升或下降斜率脉冲序列代表了特定的符号序列。

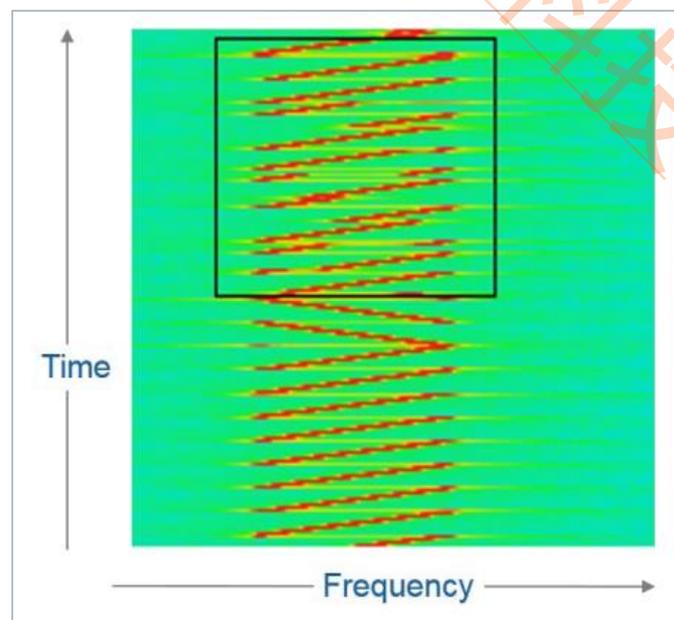


图2 由上升/下降斜率的多个脉冲构成的LoRa信号

LoRaWAN

LoRaWAN定义了网络的通讯协议和系统架构，而LoRa物理层能够使长距离通信链路成为可能。协议和网络架构对节点的电池寿命、网络容量、服务质量、安全性、网络的各种应用服务质量等影响最大。

LoRa MAC层和LoRa波形、地区因素之间的定义和交互由“LoRa Alliance”标准化组织定义和管理，所有的芯片制造商、无线模块生产商、传感器制造商、网络运营商、IT服务商和测试机构都需要根据此标准化协议进行设计开发和测试。



图3 LoRaWAN协议栈

LoRaWAN系统架构

LoRa无线技术，可在使用一台无线基站在方圆数公里的范围内构建无线网络，LoRaWAN网络是星形组网结构，LoRa物联网终端与网关无线通信，网关将数据传送至网络服务器，物联网上层应用和网络服务器连接和交互。

为保证通信安全，终端设备和网关，网关和网络服务器之间均采用128比特的AES加密。

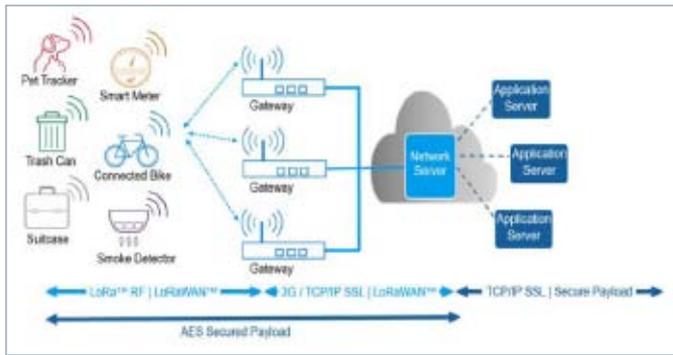


图4 LoRaWAN网络架构

LoRa设备测试

本文中的射频发射机测试均根据FCC Part15 15.247测试规范为例，其它国家和地区的测试项目和规范 (ETSI, ARIB) 和 FCC基本一致。使用的仪表为罗德与施瓦茨公司的频谱与信号分析仪和矢量信号源。下图5中为FCC规定的发射机测试限值。

| Digital modulation mode (TX-Test) | | |
|--|-----------------------------------|-----------------|
| FCC Anforderung | Parameter | Limit |
| 15.247(a)(2) | 6 dB bandwidth | ≥ 500 kHz |
| 15.247(b)(3) | Emission output power | + 30 dBm |
| 15.247(e) | Power spectral density | + 8 dBm / 3 kHz |
| 15.247(d) | Emissions in non-restricted bands | -30 dBc |
| Frequency hopping spread spectrum mode (TX-Test) | | |
| FCC Anforderung | Parameter | Limit |
| 15.247(a)(1) | 20 dB bandwidth | ≤ 500 kHz |
| 15.247(d) | Emissions in non-restricted bands | -30 dBc |
| Hybride mode (TX-Test) | | |
| FCC Anforderung | Parameter | Limit |
| 15.247(e) | power spectral density | + 8 dBm / 3 kHz |

图5 LoRa FCC发射机测试指标

针对接收机测试，FCC并未做任何定义和要求，但Semtech公司给出了典型的接收机测试推荐方法，包含接收灵敏度和阻塞测试。

发射机测试

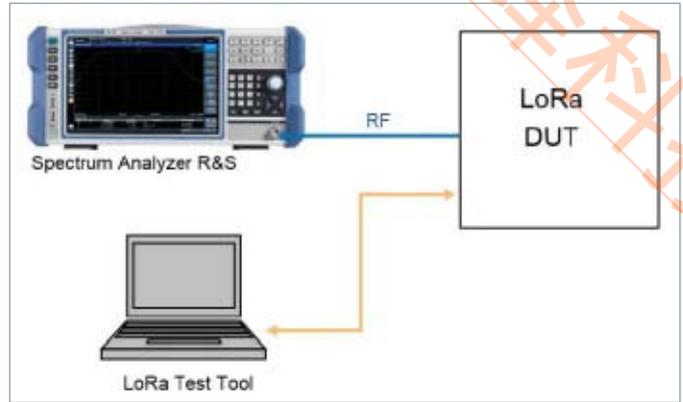


图6 LoRa发射机测试连接

针对图五中的测试要求，罗德施瓦茨公司的频谱与信号分析仪具备强大的测试测量功能，如下图7中所示，根据被测信号的测试频率，调整合适的频谱仪中心频率和带宽，加入测量Marker点后，使用Marker功能自带的6dB带宽统计功能可自动计算LoRa发射信号的带宽。针对具体测试项目，需要使用LoRa测试工具，控制发射机使用不同扩频因子的情况下测量其不同的占用带宽。



图7 6 dB带宽结果统计

针对FCC的发射功率测试，频谱与信号分析仪具备信道功率统计功能，该功能通过对整个发射带宽内的功率进行积分统计，直接读取整个信道内发射功率。其他测试项目如功率密度和杂散发射等指标也可以直接通过频谱与信号分析仪的测量功能直接实现。



图8 扩频系数=12发射功率

接收机测试

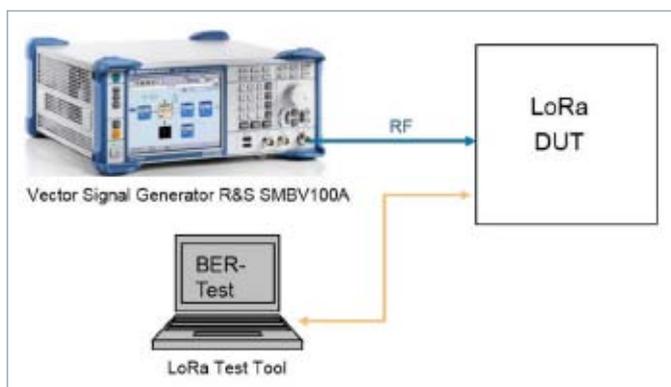


图9 LoRa接收机灵敏度测试布置

进行LoRa接收机灵敏度时，Semtech为罗德与施瓦茨公司的矢量信号源提供了一系列特定的LoRa波形文件，这些波形文件包含了各种不同的信号带宽和扩频系数，射频载波通过装载在信号源ARB内基带波形信号矢量调制，输出至接收机。通过不断降低信号源输出功率，使用LoRa测试工具监测接收机的误包率，针对不同的扩频系数，接收机的接收灵敏度范围大致为-137 dBm至-117 dBm。

如下图10中所示，可以根据测试频率调整矢量信号源输出频率和输出电平，将波形文件加载后调制至射频输出。

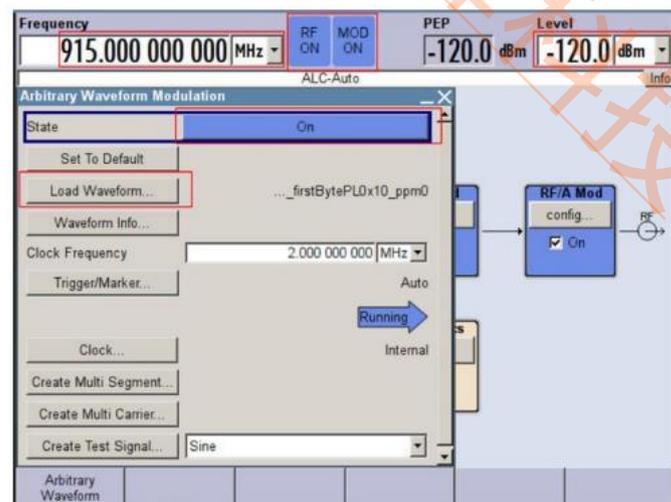


图10 矢量信号源设置界面

接收机测试的另外一项关键指标是阻塞测试，该项测试主要考察接收机在接收到强干扰信号的情况下的性能。该项测试在需要有用信号的同时，还需要增加一路干扰阻塞信号。可通过模块化信号源SGS100A提供干扰信号，和矢量信号源产生的有用信号合路后馈入接收机输入口，针对特定的阻塞电平和频率，使用LoRa测试工具观测接收机误包率，典型误包率数值要求为<1%。

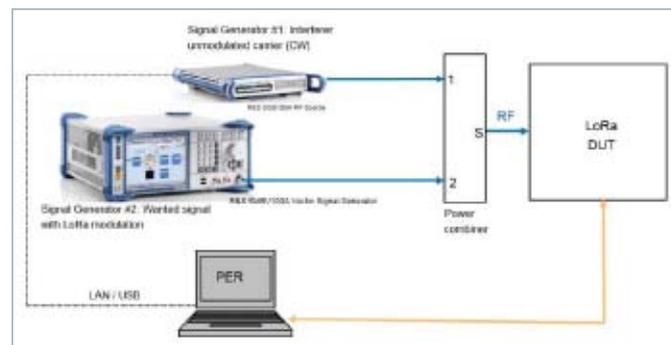


图11 LoRa接收机阻塞测试布置

小结

罗德与施瓦茨公司凭借无线通信测试领域的丰富经验，为LoRa无线通信制式测试提供了收发信机的完整测试解决方案，针对发射机的带宽、功率密度、杂散等指标可直接使用统计和统计功能实现测量；针对接收机灵敏度测试和接收机阻塞测试，使用矢量信号源和模拟干扰源可轻松搭建实验环境，同时针对生产型客户，罗德与施瓦茨还提供了丰富的低成本仪器，降低客户拥有成本，轻松实现测试线的建立。

罗德与施瓦茨公司自成立至今的八十多年间，一直致力于为无线电通信提供高性能的测试与测量仪器。请访问罗德与施瓦茨公司中文网站：www.rohde-schwarz.com.cn或就近联系罗德与施瓦茨公司各地的代表处，我们将为您提供符合您需要的测试方案和仪器。

订购信息

高端矢量信号源SMW200A

| 描述 | 选件名 | 数量 | 货号 |
|--|----------|----|--------------|
| Baseband Generator with ARB (64 Msample) and Digital Modulation (realtime), 120 MHz RF bandwidth | SMW-B10 | 1 | 1413.1200.02 |
| Signal Routing and Baseband Main Module, two I/Q paths to RF | SMW-B13T | 1 | 1413.3003.02 |
| 100 kHz to 6 GHz | SMW-B106 | 1 | 1413.0104.02 |
| Bit Error Rate Tester | SMW-K80 | 1 | 1414.6187.02 |

通用矢量信号源SMBV100A

| 描述 | 选件名 | 数量 | 货号 |
|--|-----------|----|--------------|
| Baseband Generator with Digital Modulation (realtime) and ARB (32 Msample), 120 MHz RF bandwidth | SMBV-B10 | 1 | 1407.8607.04 |
| Hard Disk (removable) | SMBV-B92 | 1 | 1407.9403.02 |
| 9 kHz to 6 GHz | SMBV-B106 | 1 | 1407.9703.02 |
| Bit Error Rate Tester | SMW-K80 | 1 | 1415.8890.02 |

高端频谱仪FSW 8G / 13.6G / 26.5G / ...

| 描述 | 选件名 | 货号 |
|------------------------------------|----------|--------------|
| OCXO Precision Frequency Reference | FSW-B4 | 1313.0703.02 |
| RF Preamplifier | FSW-B24 | |
| Transient Measurement Application | FSW-K60 | 1313.7495.02 |
| Transient Chirp Measurement | FSW-K60C | 1322.9745.02 |

通用频谱仪FSV 4G / 7G / 13.6G / ...

| 描述 | 选件名 | 货号 |
|---|-------------------|--------------|
| RF Preamplifier | FSV-B22 / FSV-B24 | |
| OCXO Reference Frequency | FSV-B4 | 1310.9522.02 |
| Analog Modulation Analysis for AM, FM, ϕ M | FSV-K7 | 1310.8103.02 |

五 802.15.4 (含Zigbee) 测试平台

IEEE_802.15.4标准定义了廉价的固定式、便携式和移动式设备物理层PHY和媒体接入层MAC规范，在现实世界中，这种技术具有低功耗、低速率、低成本的特点，更适用于工控、医疗、传感器等简单组网应用，有许多种通信协议均基于此标准实现，如ZigBee™、RF4CE、6LoWPAN、Wireless HART、SmartLink、THREAD等。

着重介绍使用罗德与施瓦茨（R&S）公司矢量信号源产生标准的IEEE_802.15.4测试信号，包括IEEE_802.15.4的PHY和MAC结构以及使用R&S IEEE_802.15.4 Frame Builder软件产生信号的方法。该软件基于EXCEL表格实现，免费使用及编辑，可对产生信号细节进行灵活配置，并可生成R&S矢量信号源可识别的数据和控制文件。

IEEE_802.15.4协议概述

IEEE_802.15.4协议主要定义了PHY和MAC，对于上层的网络层和应用层等，并没有具体定义。

IEEE_802.15.4 PHY

PHY数据服务定义了物理无线信道上发送和接收数据包的格式和类型，该数据被称作物理层协议数据单元PPDUS，同时定义了多种不同的工作频率范围，在不同的工作频率范围内，也定义了多种调制类型和数据速率，如图1。

| PHY (MHz) | 频率 (MHz) | 扩频参数 | | 数据参数 | | |
|-----------|-------------|-----------------|--------|----------------|----------------|--------|
| | | 码片速率 (KChips/s) | 调制方式 | 比特速率 (Kbits/s) | 符号速率 (KSyms/s) | 符号 |
| 780 | 779-787 | 1000 | O-QPSK | 250 | 62.5 | 十六进制正交 |
| 780 | 779-787 | 1000 | MPSK | 250 | 62.5 | 十六进制正交 |
| 868/915 | 868-868.6 | 300 | BPSK | 20 | 20 | 二进制 |
| | 902-928 | 600 | BPSK | 40 | 40 | 二进制 |
| 950 | 950-956 | - | GFSK | 100 | 100 | 二进制 |
| 950 | 950-956 | 300 | BPSK | 20 | 20 | 二进制 |
| 2450 | 2400-2483.5 | 2000 | O-QPSK | 250 | 62.5 | 十六进制正交 |

图1 PHY工作频段和数据传输速率

868 MHz频段主要被用于欧洲作为短距通信组网应用，780 MHz频段多用于中国，950 MHz则主要应用于日本，2450 MHz是被全世界广泛使用的频率标准，具有较高的数据速率和高达16路的无线信道。

PHY在设备间通信过程中主要负责如下任务：

- 激活和取消无线收发设备
- 当前信道的能量检测以及发送链路质量识别
- 信道频率选择和数据收发
- 载波多路侦听的空闲信道预测CSMA/CA

PHY标准数据帧格式PPDU由同步头SHR、物理层头PHR和PHY净荷构成，字节长度在协议中已定义，如图2所示。

| | | | |
|--------------|------------|----------|----------------|
| 4 Bytes | 1 Byte | 1 Byte | 5...127 Bytes |
| 前导码 Preamble | 帧起始分隔符 SFD | 帧长度 | PHY服务数据单元 PSDU |
| 同步头 SHR | | 物理层头 PHR | PHY净荷 |
| PPDU | | | |

图2 PHY-PPDU帧格式

SHR由前导码和紧随其后的帧起始分隔符SFD构成，前导码序列为4 Bytes数据0x00，同时SFD固定设置为0xA7。PHY层服务数据单元PSDU是由MAC帧继承而来，作为PHY的净荷，PHR定义了PSDU单元的数据长度。最高位被设置为0，其余7个字节可以表征的数据长度最大数值为127位。最终编码生成的二进制PPDU数据会通过符号映射后直接扩频为码片数据，之后通过O-QPSK映射，其具体流程如图3。

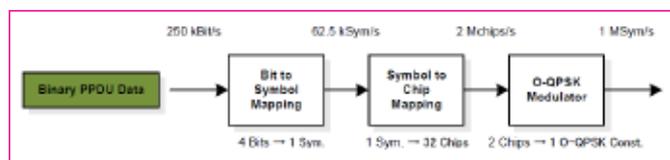


图3 O-QPSK PHY扩频和调制映射

PHY数据的O-QPSK调制处理过程，首先将数据单元的二进制数据中每四位转换为一个符号，然后将每个符号扩频转换为长度为32的码片序列，用符号查找对应16个近似正交的伪随机映射表，映射完成之后的码片数据，依次交替的分为IQ数据流，通过half-sine滤波器成形形成调制符号。

IEEE_802.15.4 MAC

MAC形成了在PHY和更高应用层之间的接口，如ZigBee的网络层。该层的MAC数据服务可以通过帧的形式接收和发送，该帧的名称为MAC协议数据单元MPDUS，也就是对应传递至PHY帧结构中的PSDU。

MAC帧结构的设计是以用最低复杂度实现在多噪声无线信道环境下的可靠数据传输为目标的。每个MAC帧都包含帧头MHR、MAC净荷MAC Payload和帧尾MFR三部分。MHR部分由帧控制信息FCF、帧序列号SN和地址信息组成。MAC的净荷部分长度可变，净荷的具体内容由帧类型决定。帧尾部分是帧头和净荷数据的16位CRC校验序列FCS。IEEE_802.15.4协议共定义了四种类型的帧，信标帧、数据帧、确认帧和MAC命令帧。这些帧格式会有区别，通用的MAC帧结构如图4所示。

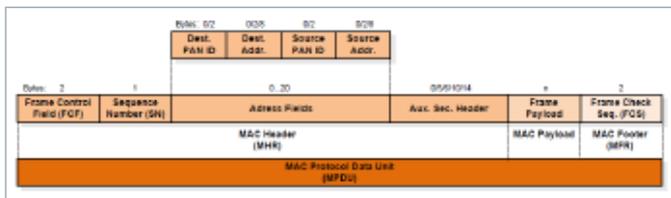


图4 MAC MPDU帧结构

FCF区域中包含了帧类型、地址信息、以及其他控制标识，该部分长度为2 Bytes。

只有广播帧和数据帧包含了高层控制命令或者数据，确认帧和MAC命令帧则用于设备间MAC子层功能实体间控制信息的收发。广播帧和确认帧不需要接收方的确认，数据帧和MAC命令帧的帧头FCF指示收到的帧是否需要确认，如果需要确认，并且已经通过了CRC教研，接收方将立即发送确认帧，若发送设备在一定时间内收不到确认帧，将自动进行重传。

R&S针对IEEE_802.15.4帧及信号波形产生方法

R&S提供了IEEE_802.15.4数据帧产生软件，该软件基于EXCEL表格，简单易用。

可方便对PHY和MAC参数进行设置，同时，该帧结构基于O-QPSK调制方式。可对如下参数进行设置：

- MAC帧头设置及净荷数据
- 帧校验码自动计算和同步头定义
- 符号至码片映射及数据生成导出
- 生成R&S矢量信号源支持的数据和控制文件
- 图形化显示帧结构等

IEEE_802.15.4 Frame Builder软件生成基带数据

软件基于VBA代码，需要在EXCEL中使能该功能。

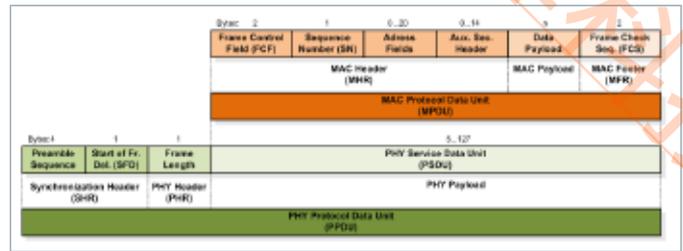


图5 R&S IEEE_802.15.4 Frame Builder软件界面

软件界面中显示了IEEE_802.15.4基本帧结构，指引使用者了解每部分具体设置作用及定义，即帧结构中各个部分的具体设置项目，可针对实际测试需求生成各部分帧定义。

- FCF区域控制信息及帧类型设置。
- MAC帧头中其他数据位设置，包括帧序列号，地址信息等。
- 导入数据载荷，可通过手动输入或ASCII十六进制文本文件导入，数据格式为16进制，导入完成后，软件会自动计算校验码并计算出最终得到的MPDU帧数据
- MAC层数据生成后，会自动计算帧长度，前导码和SFD帧分隔符也为固定值，生成最终的PHY层帧数据。
- 软件会自动将生成的数据扩频至码片数据，可设置帧与帧间的闲置符号。

IEEE_802.15.4测试波形产生

配置有实时基带发生器的R&S矢量信号源都能够实时产生调制数字信号，同时均可产生通用标准（如LTE）的数字调制信号。使用实时自定义数字调制产生测试波形的流程框图见图6。

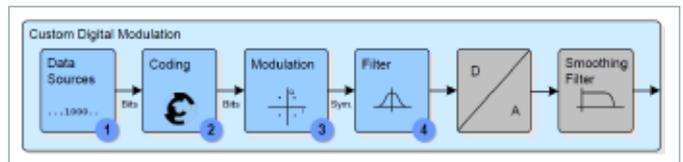


图6 自定义数字调制波形产生

- 将软件生成的标准Datalist文件导入至信号发生器的基带发生器中。802.15.4协议未规定任何的码片编码，所以无定义任意形式的编码方式。
- 802.15.4协议以O-QPSK调制映射方式未在矢量信号源中进行定义，可采用导入自定义调制映射文件的方式进行设置，软件中映射文件“15.4-OQPSK.vam”可直接使用，

如需自定义产生各种调制映射文件，可使用R&S公司的MATLAB应用工具MapWiz。

- 需要载入half-sine脉冲成形滤波器至矢量信号发生器中，Frame Builder软件中自带的滤波器文件“15.4-halfsine.vaf”也可直接被使用，如需自定义产生各种成形滤波器文件，可使用R&S公司的MATLAB应用工具FizWiz。

亦可使用计算机软件产生测试波形，采用矢量信号发生器内部的ARB发生器的方法，R&S公司提供了免费的信号生成和处理软件WinIQSim2操作简单直观，在ARB模式下，所有波形计算和处理都在计算机侧完成，矢量信号发生器只将计算好的波形播放。直接将生成的波形可通过网线传输至R&S矢量信号源，在WinIQSim2软件中也可以对生成信号的时域和

频域波形进行预览，预判生成的信号是否正确使用。ARB模式生成和播放波形的具体流程如下图7所示：

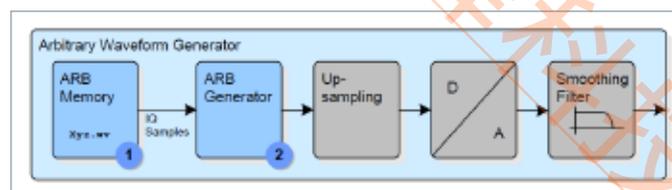


图7 ARB模式波形产生

- 将软件中生成的波形文件导入矢量信号源的ARB内存。
- 通过ARB发生器读取波形文件中的IQ数据和采样率，将其转变为基带信号，之后通过采样和上变频调制后发出。

订购信息

高端矢量信号源SMW200A

| 描述 | 选件名 | 数量 | 货号 |
|--|----------|----|--------------|
| Baseband Generator with ARB (64 Msample) and Digital Modulation (realtime), 120 MHz RF bandwidth | SMW-B10 | 1 | 1413.1200.02 |
| Signal Routing and Baseband Main Module, two I/Q paths to RF | SMW-B13T | 1 | 1413.3003.02 |
| 100 kHz to 6 GHz | SMW-B106 | 1 | 1413.0104.02 |

通用矢量信号源SMBV100A

| 描述 | 选件名 | 数量 | 货号 |
|--|-----------|----|--------------|
| Baseband Generator with Digital Modulation (realtime) and ARB (32 Msample), 120 MHz RF bandwidth | SMBV-B10 | 1 | 1407.8607.04 |
| Hard Disk (removable) | SMBV-B92 | 1 | 1407.9403.02 |
| 9 kHz to 6 GHz | SMBV-B106 | 1 | 1407.9703.02 |

高端频谱仪FSW 8G / 13.6G / 26.5G / ...

| 描述 | 选件名 | 货号 |
|------------------------------------|---------|--------------|
| OCXO Precision Frequency Reference | FSW-B4 | 1313.0703.02 |
| RF Preamplifier | FSW-B24 | |
| Vector Signal Analysis | FSW-K70 | 1313.1416.02 |

通用频谱仪FSV 4G / 7G / 13.6G / ...

| 描述 | 选件名 | 货号 |
|--------------------------|-------------------|--------------|
| RF Preamplifier | FSV-B22 / FSV-B24 | |
| OCXO Reference Frequency | FSV-B4 | 1310.9522.02 |
| Vector Signal Analysis | FSV-K70 | 1310.8455.02 |

射频微波测试大平台

微波技术是近代科学研究的重大成就之一，它的应用领域非常广泛。经过几十年的发展，中国已经逐步建立了自己的微波产业。近年来，中国在射频、微波和毫米波技术，特别是航空、航天、国防、通信等领域的应用取得了空前的成就。随着经济的发展和市场需求，在未来十年，中国的微波毫米波事业将会有突飞猛进的加速发展。同时也使众多致力于射频微波产品研发和生产的企业面临新的测试挑战。

一 最新通用射频微波元器件测试平台

射频微波元器件发展及测试要求

射频微波元器件是一切无线电子装备、无线电子信息系统和武器装备无线控制系统的基础，直接影响系统的性能和功能。射频微波元器件是装备发展的基础，也是军民两用技术发展的重要支柱。随着无线系统技术的发展，射频微波元器件早已从分离元器件进入了高端集成化的新型元器件时代。新型电子元器件体现了当代和今后电子元器件向高频化、片式化、微型化、薄型化、低功耗、响应速率快、高分辨率、高精度、高功率、多功能、组件化、复合化、模块化和智能化等的发展趋势。

无论射频微波元器件功能与性能如何发展，都需要通过完整的测试来评估其各方面性能与功能，判断其是否满足设计指标的性能要求。通过测试一方面可验证设计正确性，另一方面也可利用测试的性能参数可以对设计的电路进行修正和优化。微波射频电路典型的性能指标包含线性传输反射特性参数，非线性指标，噪声性能，功耗等方面。通用仪表具备很高的测试精度和完整的测试能力。能完成对低噪声放大器，功率放大器，混频器，频率综合源，滤波器等典型射频微波元器件的参数进行测试分析。

射频微波元器件的测试指标繁多，下面图表简明扼要的列举了常见元器件类型以及测试指标：

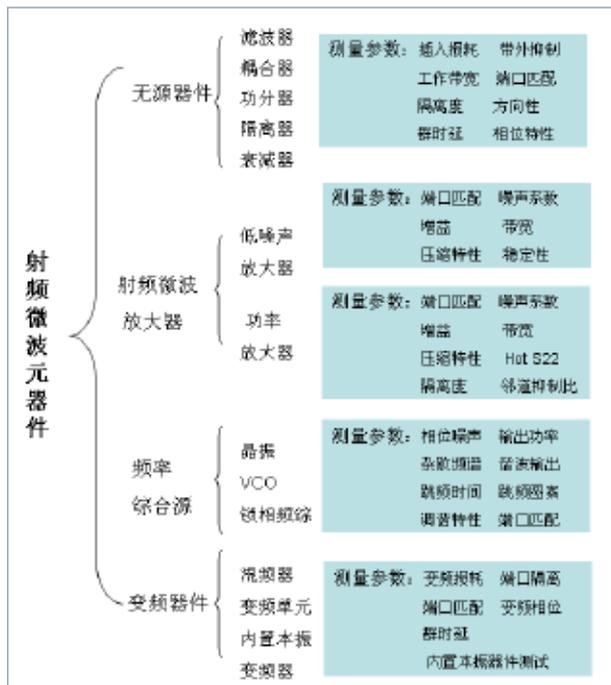


图1：元器件测试类型与指标

射频频微波元件测试技术方案

针对上述射频频微波元件测试的需求，下图列举了通用设备种类以及其对应常见测量项目：

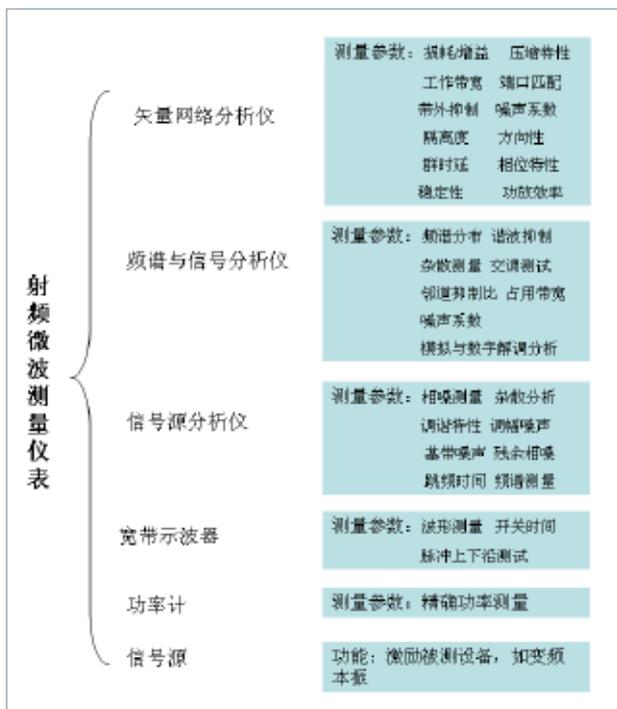


图2：通用设备种类以及其对应常见测量项目

R&S 公司能提供上图中所有的通用测量设备，这些设备不仅能满足上图中所有的测试需求，也能提供一些独特的测试功能。下面按不同设备种类分别予以详解。

矢量网络分析仪 – R&S®ZVA



R&S®ZVA系列矢量网络分析仪是要求高性能、多用途的有源、无源器件和模块测量的理想选择，单台仪表可覆盖10 MHz-67 GHz频率范围，也可通过与R&S®ZVA-Zxx系列的

毫米波频率扩展模块将测试频率扩展到500 GHz，此外支持多种功能如：支持混频器和变频器（线性和非线性）的标量和矢量测量、放大器噪声测量，脉冲S参数测量。

ZVA67矢量网络分析仪主要参数

| 名称 | 参数 | 功能 |
|-------|---|---|
| ZVA67 | <p>频率范围：10 MHz-67 GHz (最高频率可设置70 GHz) 端口数量：2/4端口</p> <p>内置信号源数目： 2端口版本 2个独立信号源 4端口版本 4个独立信号源</p> <p>动态范围：110 dB,typ@67 GHz 103 dB,typ@70 GHz 输出功率：+6 dBm,typ@67 GHz +2 dBm,typ@70 GHz 测量带宽：30 MHz 扫描和数据传输时间：3.5 us/2.9 ms</p> <p>多种应用测量软件</p> | <p>4个锁相源，可输出4路相参信号</p> <p>测量谐波混频器</p> <p>测量混频器的交调指标(需3个源)</p> <p>测量多级变频链路的损耗和交调指标(需4个源)</p> <p>S参数、1 dB压缩点、互调测试、矢量变频器测量、内置本振的群延时测量、脉冲信号测量，差分测量等参数测量</p> |

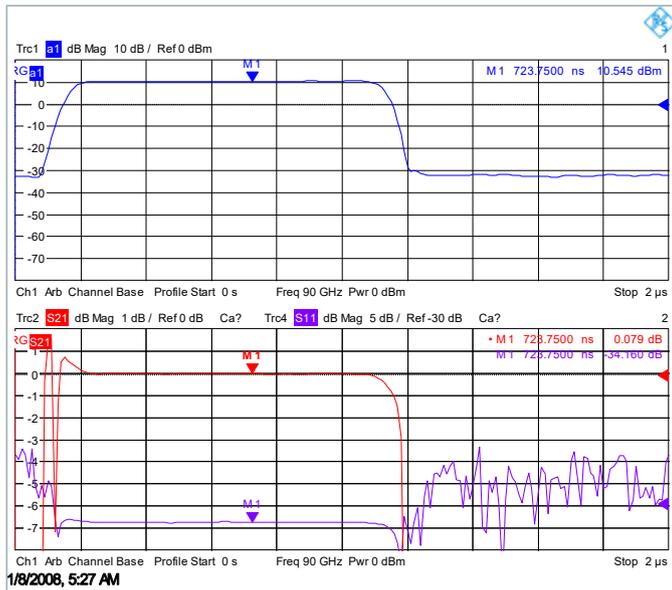
R&S®ZVA作为高端矢量网络分析除了可以进行高质量的S参数外，也提供了丰富的应用测量功能。

脉冲S参数测量 R&S ZVA-K7

常规S参数测量其信号激励与接收都是在连续波的情况下进行的，但对于有些情况下，如TDMA通信系统或雷达系统中，激励信号应为脉冲信号，所以针对这种测试需求，R&S推出测量应用ZVA-K7用于脉冲情况下的S参数测量，其可以支持的测量模式有：

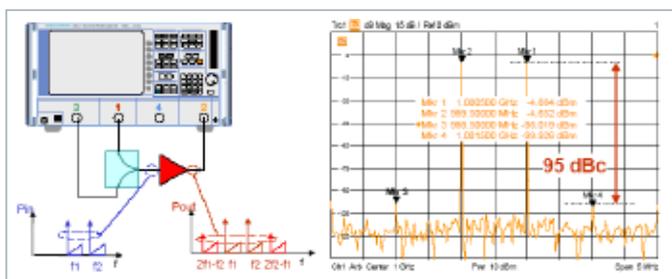
- 脉内平均情况下的扫频S参数测量
- 脉内去点情况下的扫频S参数测量
- 脉冲时域包络测量

R&S®ZVA-K7可扩展ZVA的测量带宽到30 MHz，用于应对超窄脉冲的测量，其最小测量脉宽为50 nS，脉冲时间分辨率率为12.5 nS。下图为载波频率90 GHz的脉冲实际测试结果：



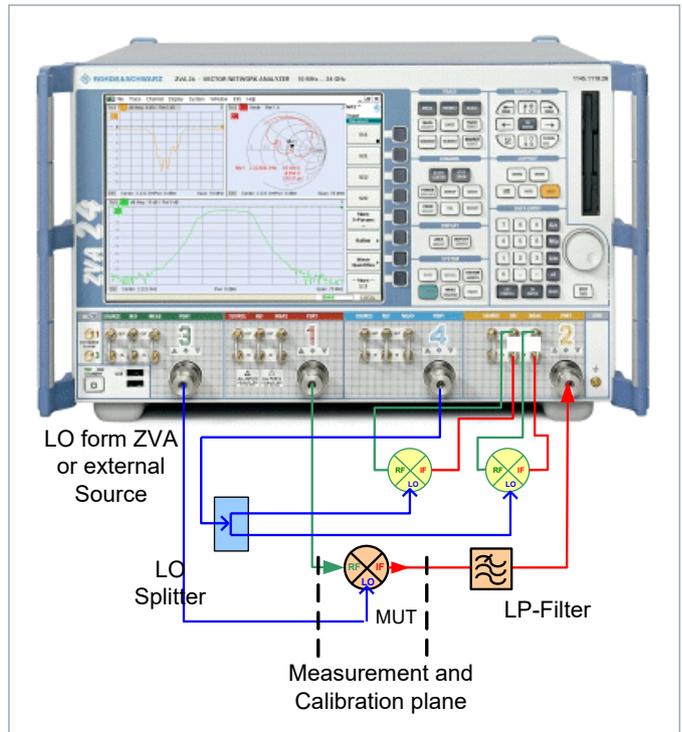
变频测量R&S®ZVA-K4

S参数的测量下，矢网的输入输出频率一致，而对于很多器件的指标测量中需要激励频率与输出频率并不一致，如变频损耗测量、谐波测量、交调测量，这就需要矢量网络分析仪可以独立的设置激励源的频率与接收机频率。R&S®ZVA-K4 软件使ZVA具备任意设置源与接收机的频率，用于完成放大器谐波、交调、热态S22，变频器件的变损，谐波，交调等测量。典型测试图如下：



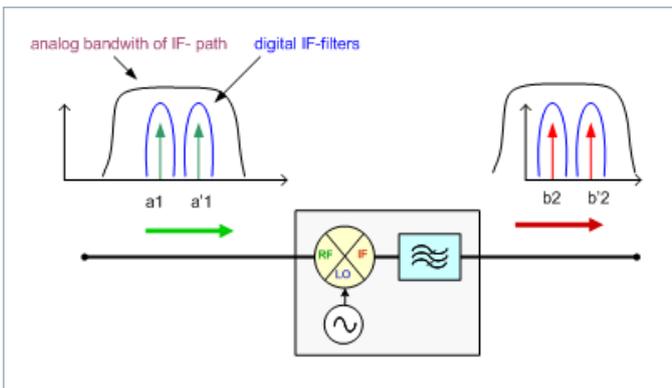
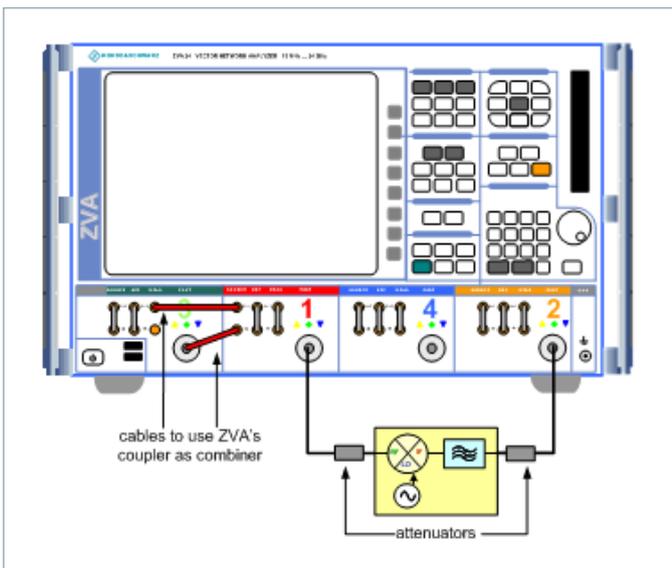
矢量变频测量R&S®ZVA-K5

上文提到R&S®ZVA-K4 能进行变频损耗的测量，属于标量测量的范畴。对于一些应用场合中，如多通路接收机测量，也需要进行变频器件的绝对相位进行测量，这时可以使用R&S®ZVA-K5进行。R&S ZVA-K5特点在于除了可进行双向反射与传输幅度量值的测量也可进行双向相位测量，其测量的框图如下：



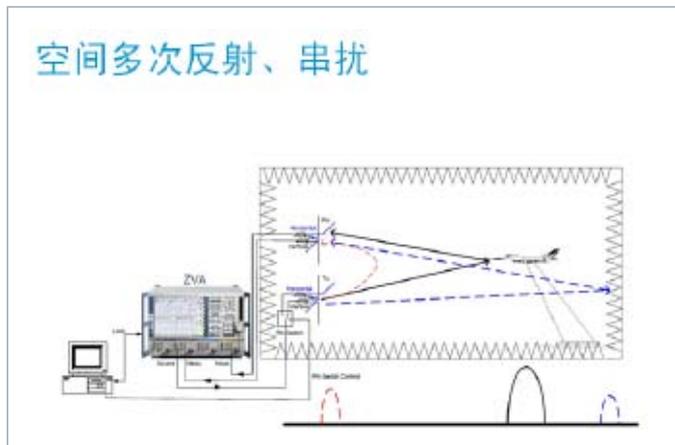
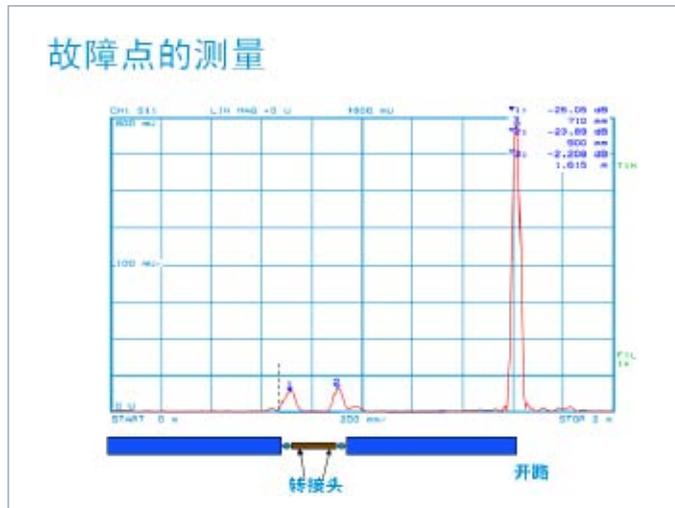
内置本振的变频群时延测量R&S ZVA-K9

上文中R&S®ZVA-K5，可以对变频器件的绝对相位进行测量，而相位信息可转换为群时延测试的结果。但是通过R&S®ZVA-K5测量框图可知，测量能进行的前提是变频器的本振是可接入的。对于不可接入本振的变频器，无法按ZVA-K5进行测量，针对这种情况R&S推出带有专利技术的R&S®ZVA-K9测量应用，其采用双音法进行内置本振的变频群时延测量。测量激励信号为双音信号，通过比较双音之间在变频前后的相对相位变化计算器件的群时延特性。该方案相对于业界其他方法如：本振重建法，其测试结果更稳定。对于多级变频也可使用该方法，而本振重建法对于多级变频往往无能为力。R&S®ZVA-K9的测试框图如下：



时域测量R&S ZVAB-K2

传统的扫频S参数只能提供给用户在当前测量端面上反射或端面之间传输总量值。如果端面上存在多次反射或端面间存在多次传输路径，采用传统矢网无法从予以分辨。而ZVAB-K2时域测量选件通过甄别多次反射与传输量的时间差，可以在时间域上将多次反射与传输量清晰分辨出来，广泛用于电缆断点、滤波器调测与天线测量中。ZVAB-K2也提供时间门的功能用于将提取特定时间段的传输与反射量，过滤其它的多次反射与传输量，该功能也可用于天线测量中消除由测量场地带来的多次反射量。



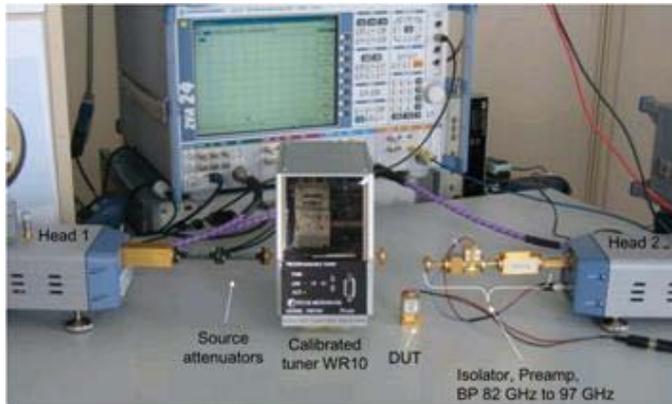
噪声系数测试

R&S®ZVA采用噪声系数的定义进行噪声系数的测量，其接收机特有的双数字处理通道可实现平均值与均方根值检波并行的测试，分别得到信号功率与信号加噪声的功率值。然后通过简单的计算得到输入、输出信噪比，最后通过噪声系数的定义输入与输出信噪比的比值得到待测件的噪声系数。这种方法无需噪声源与阻抗调谐器参与，即可精确测得待测件的噪声系数，适用于变频与非变频器件。

功率放大器负载牵引测试

对于功率放大器的设计与建模而言，负载牵引法是最直接、最高效的方法。R&S®ZVA 矢网可配合业界各种负载牵引系统完成系统的校准与测量。下图ZVA与

Focus公司负载牵引设备连接完成毫米波频段的负载牵引测量：

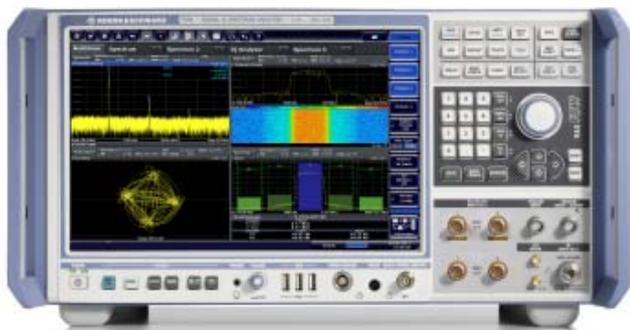


射频微波IC探针台测试

随着半导体技术的发展与电子组装技术的发展，射频微波器件已有以前的分离封装器件向高度集成单片化方向发展。为了提高产品的品质与成品率，半导体厂商不仅需要封装后的在片测量，也需要在封装前的晶片级测量，从而需要更高频率与精度探针台测试应用。另一方面为了实现系统的小型化，越来越多的系统设计公司，直接使用晶体裸片而非封装器件进行电路设计，而在设计生产前，他们同样也需要IC探针台系统进行器件的测试挑选与建模。针对这种测试趋势，R&S非常注重和各大探针台厂商的合作，如cascade公司的全系列探针平台与软件均可支持R&S®ZVA，下图为cascade公司探针台与R&S ZVA实际连接测试图：

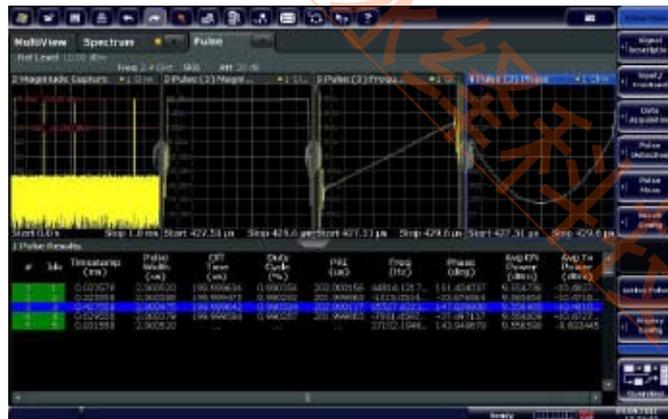


频谱与信号分析仪 – R&S®FSW

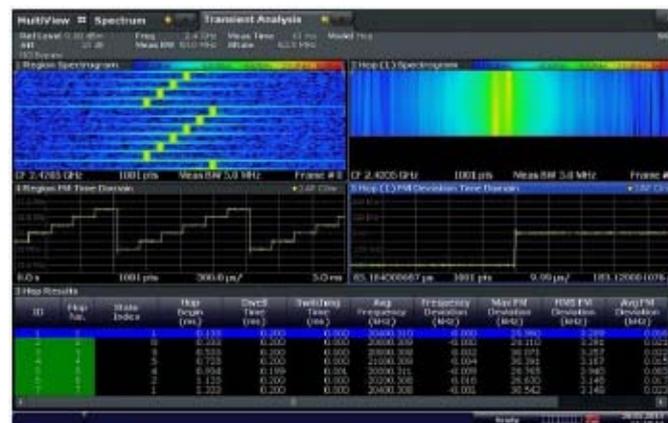


R&S®FSW高端信号与频谱分析仪，除可以进行信号的频谱分析外也可对宽带数字信号进行解调分析，R&S®FSW主要功能有：

- 可测量发射机输出信号的频谱分布，如信道功率、信道带宽，带外发射门限、谐波发射，交调进行测量。
- 可与噪声源配合进行接收机以及增益模块的噪声系数与增益测量。
- 自身具备良好的相位噪声特性，可自动测量高质量信号的相位噪声曲线。
- 脉冲解调分析的功能可完成对各类脉冲调制如：线性调频、Barker及其他相位编码雷达信号的测试，也可具备脉冲统计分析工具，可对最大10万个脉冲波形进行统计分析，分析的参数包括脉冲上升时间、下降时间、重复周期以及脉冲幅度、频率、相位变化等。



R&S®FSW脉冲分析功能



R&S®FSW跳频信号分析功能

瞬态分析功能，能够实现对跳频信号、线性调频信号等瞬态调频信号的自动测量，如跳频时间、持续时间、平均频率、频率误差、功率等。瞬态分析可用于跳频信号的跳频图案测量、线性调频信号的线性度测量。瞬态分析选项可以让使用者灵活的选取分析区间，从而可以有效避免干扰信号。

解调各种数字调制信号，并对调制质量进行分析，如星座图，眼图等。

MultiView功能可同时显示频域、时域与调制域以及各种测试应用测量，各种测试结果一目了然，无需在各种模式间切换，极大提高测试效率多标准无线测试技术，可同时分析多个载波上的多种调制信号，了解各个载波间的串扰情况。最大可配备1.2 GHz解调带宽，对宽带跳频与OFDM信号进行信号分析。

可配备2 GHz带宽模拟中频输出与示波器先结合可实现超宽带信号分析。

相位噪声分析仪和VCO测试仪 – R&S®FSWP

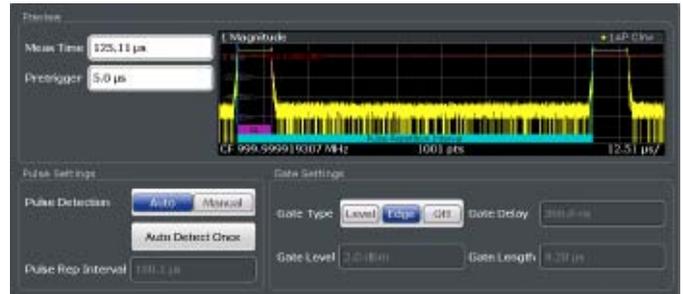


R&S®FSWP相位噪声分析仪和VCO测试仪结合极低噪声内部源和互相关技术，实现了相位噪声测量的超高灵敏度。因此，即便测量高度稳定的源（例如在雷达应用中的源）也只需几秒钟。脉冲信号测量、附加相位噪声（包括脉冲）特性描述以及集成化高端信号和频谱分析等附加选件使此分析仪成为一台无与伦比的测试仪器。

R&S®FSWP采用全新的数字相位与幅度解调的方法进行相位噪声与调幅噪声的并行测量，无需传统锁相鉴相法所需的复杂的环路控制与环路参数校准，可提供更多测试功能，更快的测量速度与更低的测试灵敏度。其内置低噪声参考本振源，可测量大部分市售的频率合成器和振荡器，无需任何附加选件。针对高端应用，R&S®FSWP可配置第二接收通道使用互相关测量法增加灵敏度（最高增加25 dB，取决于互相关次数）。得益于极佳的内部源和基本数字化的架构，此分析仪的测试速度快于对鉴相器输出信号进行数字化的测试系统：



在国防航空领域，脉冲信号的相位噪声测试一直以来都是一个测试挑战。传统的测试方法，测试所需外围附件众多，如脉冲同步、重频滤波器等，且根据不同的测试脉冲波形，需要重新配置外围附件与重新校准。而R&S®FSWP所具备的全数字化的结构，无需任何的外围附件，使用连续波测试相同的硬件框架就可进行脉冲信号的相位噪声测量。测试所需的同步、重频滤波与脉冲宽时间门都能在数字域灵活的实现。



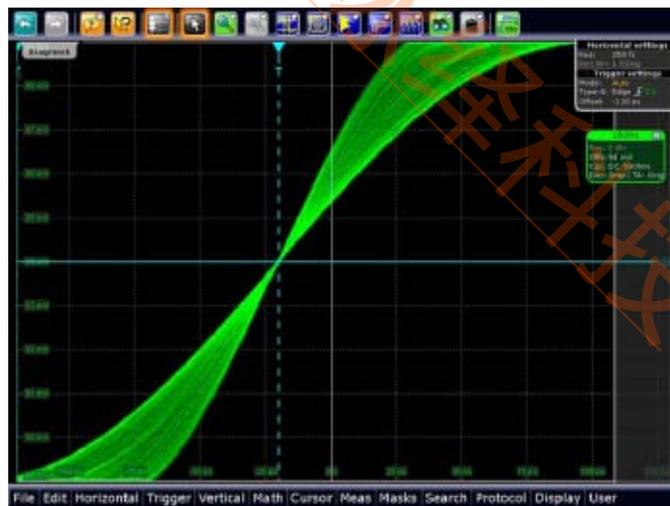
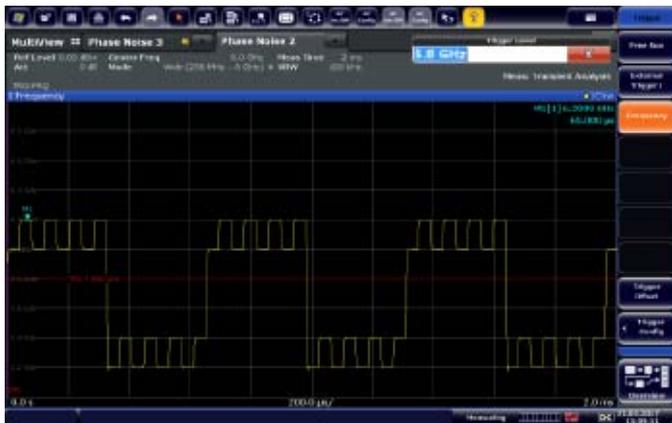
脉冲信号数字自动识别

随着系统性能与功能不断提高与丰富，系统对部件的要求也越来越高。传统意义上，系统对相位噪声的测试要求主要针对各类频率源，但是随着技术要求的提高，对于两端口器件如放大器等器件的附加相位噪声的测试需求也逐渐增多，如脉冲功放链路的附加相位噪声测试。针对附件相位噪声测试，传统的测试仪表需要配合外置的激励源、功分与移相器才能进行，而全新的R&S®FSWP内置激励源与功分等附件无需任何外部器件就可进行附加相位噪声甚至是脉冲附加噪声的测试。

R&S®FSWP内置直流调谐电压输出、供电电压与辅助电压输出各一路，供电端口输出最大电流2 A，调谐端口电压调谐范围：-10 V至28 V，能方便的实现VCO的各种调谐特性的测量：



针对客户关于频综源频率稳定时间，跳频速度等测试需求，R&S®FSWP可以实现对256 MHz – 8 GHz（7.74 GHz 频率跨度）频率范围内任意跳频信号分析能显示频率、相位随时间变化曲线，方便客户进行上述测量：



数字触发系统保持稳定的触发时刻

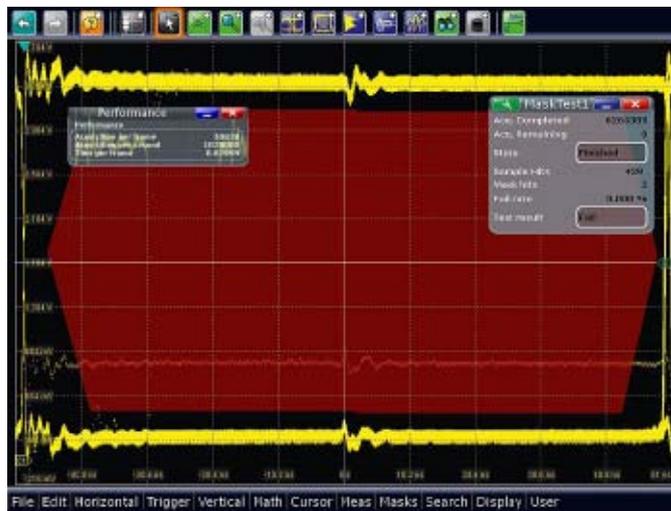
R&S®FSWP全系列标配了标准频谱仪功能，可以实现频谱仪所有频谱测量功能如进行杂散、谐波测量。

对于瞬间毛刺信号的捕捉，以往的示波器波形捕获率低，往往很难抓到，R&S®RTO高达每秒一百万次的捕获率可大大提高捕获概率、减小等待时间，提高测试与诊断能力。

宽带示波器 – R&S®RTO

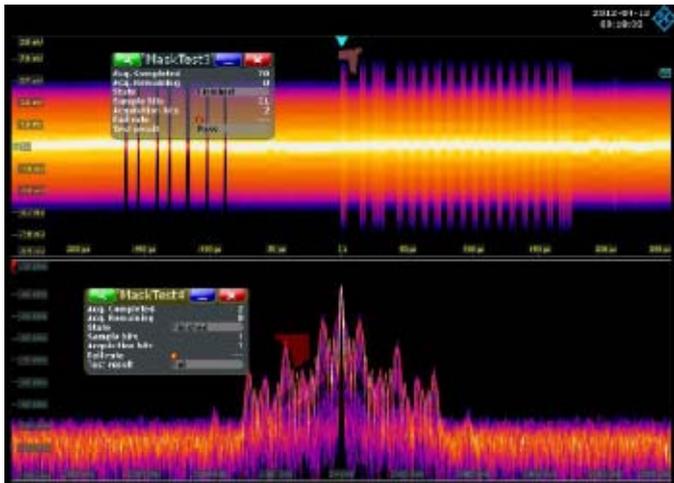


RTO示波器具有极佳的信号保真度、极高的采样率和全球第一个实时数字式触发系统，结构紧凑。目前RTO系列示波器的最大带宽为6 GHz，满足常规测试需求。该系列示波器具有硬件加速的测量和分析功能。



每秒一百万次的捕获率用于模板测试中

R&S®RTO具有快速、易用FFT功能，其FFT功能完善可实现频域触摸模板，为设计人员提供了除传统时域外的频域观察信号的途径。



带频谱模板触发的FFT功能

对于测量小信号时，以往的示波器自身的噪声大且小垂直刻度下带宽受限，很难真实观测小信号，而R&S®RTO自身噪声极小且可实现全量程范围内的满带宽测量，确保小信号的测量精度。

功率计 - R&S NRP2 + NRP-Zxx



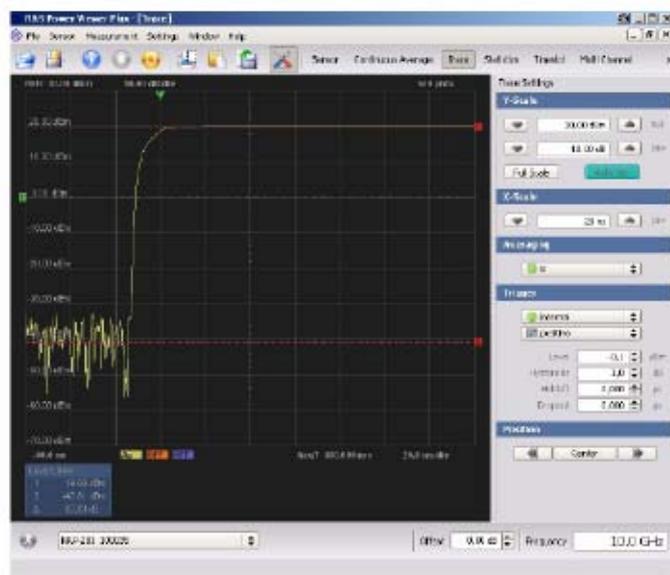
精确测量射频功率是电子测试与测量领域中最具挑战性的任务之一，R&S®NRP2功率计是研发、生产、维修及校准实验室等众多应用领域的理想工具。除了R&S®NRP2基本单元外，还有许多可供各种测量的探头。复杂的数字调制信号(例如WCDMA 和 WiMAX™ 等无线标准) 的处理与连续波信号、模拟调制载波(例如AM、FM) 脉冲信号一样容易。

每个R&S®NRP-Zxx探头都是一件独立的测试仪器，可直接通过USB操作。探头通常使用R&S®NRP-Z4无源USB适配器进行连接。无论何种型号，测量前都无需校准，因为校准数据在出厂前已经直接存储在探头内。

R&S®NRP-Z系列中的功率探头R&S®NRP-Z85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，与其他R&S®NRP-Z系列中的功率探头探头一样，其可连接功率计主机NRP2或通过USB接口直接与PC机连接后可以进行高精度的功率测量。除平均功率测量外，R&S®NRP-Z85也可进行时域功率测量，它的分析带宽高达30 MHz(探头上升时间<13 ns)，非常适合脉冲信号时域分析。另外，R&S®NRP-Z85也可以进行精确的平均值功率测量，功率电平范围为：-60 dBm - +20 dBm，频率范围：50 MHz - 40 GHz。

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(如内部出发、外部触发、门限触发)，确保了正确的测量结果。



时域脉冲波形测试

微波信号源 – R&S®SMF100A



R&S®SMF100A微波信号信号发生器是一款一流的、最新技术微波信号发生器，它开创了微波信号发生器的新标准。它覆盖研发、生产、服务、维护和维修众多领域的应用。

SMF100A的频段范围宽大，通过特定配置可达到100 kHz 至43.5 GHz。除了连续波信号外，还可生成所有常见类型的模拟调制 (AM, FM, ϕ M, 脉冲调制) 或组合。R&S®SMF100A 信号发生器还提供现代图形用户界面，以帮助快速、直观的完成操作。在微波信号发生器中第一次可通过方框图来控制的设置以及信号流向可一目了然地进行查看。

- 最大频段范围100 kHz 至22/43.5 GHz
- 出色的单边带相位噪声，典型值 -120 dBc (10 GHz时载波偏置10 kHz)
- 输出功率非常高，典型值为+25 dBm
- 可选配参数更佳的脉冲调制器： > 80 dB开关闭， < 10 ns
- 上升/下降时间， < 20 ns脉冲宽度
- 可选配脉冲发生器
- 满足高安全要求的可选移动式小型闪盘
- 精确功率测量时R&S®NRP-Zxx功率探头的连接器
- 连接R&S®NRP-Zxx功率探头时，可用于标量网络分析
- 通过GPIB、以太网或USB进行远程控制

LCR表 – R&S®HM8118



内置精密电桥进行精确的阻抗分析，无论是低阻抗范围还是高阻抗范围，R&S®HM8118均能提供极快的测量速度和出色的测量性能，是元件和材料的常规研发测试及制造过程测试的理想工具。R&S®HM8118支持各种测试附件，适用于多种应用，这些附件可使元件测量变得简单而可靠。

- 基本准确度：0.05%
- 测量功能：L, C, R, |Z|, X, |Y|, G, B, D, Q, θ , Δ , M, N
- 测量频率：20 Hz~200 kHz
- 测量速度：最高可达12次/秒

配置信息

| 仪表型号 | 主要功能与性能 | 备注 |
|--|--|----|
| ZVA 矢量网络分析仪 选件: B16 + B21 + B32 + K4+K5+K7+K9+K30+4* ZV- Z95 + ZV-Z229 | <ul style="list-style-type: none"> ▮ 测试端口动态范围>135 dB, 使用直接接入动态范围>145 dB ▮ 可对放大器和变频器件进行谐波、压缩点、互调和Hot S22测量 ▮ 无需噪声源即可对放大器噪声系数进行测量 ▮ 变频器件幅度与绝对相位测量 ▮ 内置本振变频器件群时延测量 ▮ 脉冲时域包络测量拥有12.5 ns 分辨率和高达30 MHz 的测量带宽, 最小脉宽50 nS ▮ 脉内取点扫频脉冲测量, 最小脉宽450 ns | |
| FSW 信号与频谱分析仪 选件: B4+B24+B1200+B17+K6+K60 +K7+K70+K40 | <ul style="list-style-type: none"> ▮ 相位噪声低至-137 dBc /Hz (10kHz offset f = 1 GHz) ▮ 总幅度测量不确定度仅有 0.4 dB ▮ 最大1.2GHz解调带宽, 对宽带脉冲与跳频信号进行完整分析 ▮ 脉冲分析功能软件K6, 统计分析脉冲序列各项指标 ▮ 瞬态信号分析功能K60, 自动分析跳频与线性调频信号 ▮ I/Q数据记录, I/Q内存可达200 Msamples ▮ 灵活的模拟和数字基带信号分析 ▮ 能够解调几乎所有的调制类型 | |
| FSWP 相位噪声分析仪和VCO测试仪 选件: B1 + B4 + B24 + B60 + B61+ B64 + K4 | <ul style="list-style-type: none"> ▮ 高灵敏度相位噪声与调幅噪声并行测量 ▮ VCO调谐特性全面测量 ▮ 内置DC源, 方便VCO调谐特性, 最大电流2000 mA ▮ 支持瞬态测量, 测试频率稳定或跳变时间, 最大频跨7.74 GHz ▮ 支持脉冲信号相位噪声测试 ▮ 内置频率输出至18 GHz信号源, 支持附加相位噪声测试 ▮ 含频谱仪全部频谱测量功能, 方便全面衡量待测件 | |
| RTO2064 宽带示波器 选件: B104 + 2* RT-ZS60 | <ul style="list-style-type: none"> ▮ 在所有档位实现6 GHz分析带宽 ▮ 最高波形捕获率: 100万个波形/秒 ▮ 存储深度: 400 M samples /CH ▮ 通道隔离度: 大于60 dB ▮ 硬件实现FFT分析功能, 可实现频谱模板触发 | |
| SMF100A 微波模拟信号源 选件: B144, B1+B2+B20+B22+B27+ B34+K3+K23+K27 | <ul style="list-style-type: none"> ▮ 最高输出频率43.5 GHz ▮ 典型输出功率23 dBm (f = 10 GHz) ▮ 相位噪声小于 -115 dBc/Hz (f =10 GHz) ▮ 可实现极窄脉冲输出, 脉冲宽度50 nS脉冲关断比大于80 dB单脉冲, 双脉冲, 自定义脉冲序列输出能力 ▮ 支持各种单音与双音模拟调制 | |
| NPR-Z85 宽带峰值功率探头 选件: NRP-ZKU NRP2 | <ul style="list-style-type: none"> ▮ 80 MHz的采样频率, 实现12.5 nS的时间分辨率 ▮ 支持交错采样实现100 pS的周期脉冲上下沿测试 ▮ -60 dBm到20 dBm测量幅度范围 ▮ 可通过USB与电脑或R&S仪表互联, 直接显示功率值 ▮ 免费软件NRP-Power viewer可实现脉冲参数自动测量 | |
| R&S HM8118 LCR表 HO880 + HZ181 | <ul style="list-style-type: none"> ▮ 测试频率范围: 20Hz~200kHz ▮ 测试功能: L, C, R, Z , X, Y , G, B, D, Q, θ, Δ, M, N ▮ 测试速度: 最高可达12次/秒 | |

二 毫米波太赫兹测试平台

概述

毫米波 (millimeter wave): 波长为1~10毫米的电磁波称毫米波, 它位于微波与远红外波相交叠的波长范围, 因而兼有两种波谱的特点。毫米波的理论和技术分别是微波向高频的延伸和光波向低频的发展。

毫米波与较低频段的微波相比, 有以下特点:

- (1) 可利用的频谱范围宽, 信息容量大。
- (2) 易实现窄波束和高增益的天线, 因而分辨率高, 抗干扰性好。
- (3) 穿透等离子体的能力强。
- (4) 多普勒频移大, 测速灵敏度高。

与光波相比, 它们利用大气窗口 (毫米波与亚毫米波在大气中传播时, 由于气体分子谐振吸收所致的某些衰减为极小值的频率) 传播时的衰减小, 受自然光和热辐射源影响小。

毫米波在通信、雷达、制导、遥感技术、射电天文学和波谱学方面都有重大的意义。利用大气窗口的毫米波频率可实现大容量的卫星-地面通信或地面中继通信。利用毫米波天线的窄波束和低旁瓣性能可实现低仰角精密跟踪雷达和成像雷达。在远程导弹或航天器重返大气层时, 需采用能顺利穿透等离子体的毫米波实现通信和制导。高分辨率的毫米波辐射计适用于气象参数的遥感。用毫米波和亚毫米波的射电天文望远镜探测宇宙空间的辐射波谱可以推断星际物质的成分。

太赫兹波是指频率在0.1 THz到10 THz范围的电磁波, 波长大概在0.03到3 mm范围, 介于微波与红外线之间; 从频率上看, 在无线电波和光波, 毫米波和红外线之间; 从能量上看, 在电子和光子之间。在电磁频谱上, 太赫兹波段两侧的红外和微波技术已经非常成熟, 但是太赫兹技术基本上还是一个空白, 其原因是在此频段上, 既不完全适合用光学理论来处理, 也不完全适合微波的理论来研究。太赫兹的独特性能给通信 (宽带通信)、雷达、电子对抗、电磁武器、天文学、医学成像 (无标记的基因检查、细胞水平的成像)、无损检测、安全检查 (生化物的检查) 等领域带来了深远的影响。由于太赫兹的频率很高, 所以其空间分辨率也很高; 又由于它的脉冲很短 (皮秒量级) 所以具有很高的时间分辨率。太赫兹成像技术和太赫兹波谱技术由此构成了太赫兹应用的两个主要关键技术。同时, 由于太赫兹能量很小, 不会对物质产生破坏作用, 与X射线相比更具有优势。

毫米波与太赫兹应用于研究对测试测量也提出一系列的要求。

1. 信号产生: 具有一定功率电平的连续波、脉冲信号、宽带调制信号;
2. 信号分析: 频谱测量、模拟数字解调;
3. 元件测试: S参数测量、天线测试、散射特性分析、放大、上下变频器分析;
4. 单片集成电路: 在片测量、参数测量与提取。

毫米波测试技术方案

信号产生

毫米波信号的产生是以信号源为基础倍频获得。R&S的信号源SMF100A系列具有大功率低相噪的特点, 能产生43 GHz以下的高质量信号, 同时支持调频、脉冲、脉内先行调频等调制方式。通过倍频器SMZ系列倍频器 (有源) 可以获得高达170 GHz的信号。由于倍频的非线性, 调制后的毫米波信号可以实现FM和 ϕ M, 以及脉冲调制。同时能够实现脉内线性调频信号。产生信号的电平达到+3 dBm (170 GHz), 并可以利用倍频器内置的电子和机械衰减器, 分别实现信号电平的衰减调节。机械衰减值达到25 dB, 而电子衰减的调节达到15 dB。



| 名称 | 型号 | 描述 | 输出功率 | 接口类型 |
|-----|---------------|-----------------|---------------|-------|
| 倍频器 | R&S®SMZ75 | 50 GHz至75 GHz | +5 dBm (typ.) | WR15 |
| | R&S®SMZ-B75M | 选配机械衰减器 | +4 dBm (typ.) | |
| | R&S®SMZ-B75E | 选配电子衰减器 | +1 dBm (typ.) | |
| 倍频器 | R&S®SMZ90 | 60 GHz至90 GHz | +5 dBm (typ.) | WR12 |
| | R&S®SMZ-B90M | 选配机械衰减器 | +4 dBm (typ.) | |
| | R&S®SMZ-B90E | 选配电子衰减器 | +1 dBm (typ.) | |
| 倍频器 | R&S®SMZ110 | 75 GHz至110 GHz | +5 dBm (typ.) | WR10 |
| | R&S®SMZ-B110M | 选配机械衰减器 | +4 dBm (typ.) | |
| | R&S®SMZ-B110E | 选配电子衰减器 | +1 dBm (typ.) | |
| 倍频器 | R&S®SMZ170 | 110 GHz至170 GHz | +8 dBm (typ.) | WR6.5 |

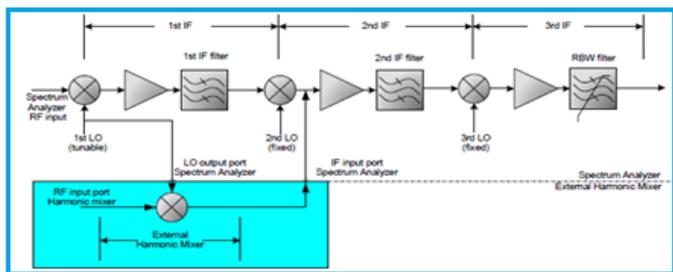
信号分析

信号分析以频谱分析仪（信号分析仪）为基础，通过相应频段的谐波混频器，将毫米波信号下变频到低频段进行分析。R&S信号分析仪系列仪器FSV30/40, FSVA30/40, FSVR30/40, FSW26/43//50/67/85等通过外接谐波混频器，可以进行高达500 GHz的信号分析。其中，信号分析仪提供谐波混频器的本振信号，经过变频后的信号（中频）直接接到信号分析仪的第二级中频接收端。利用信号分析仪的后续部分进行处理和分析。



| 名称 | 型号 | 频率 | 接口类型 |
|-----------|-------------|-----------------|------|
| 毫米波谐波下变频器 | R&S®FS-Z60 | 40 GHz至60 GHz | WR19 |
| 毫米波谐波下变频器 | R&S®FS-Z75 | 50 GHz至75 GHz | WR15 |
| 毫米波谐波下变频器 | R&S®FS-Z90 | 75 GHz至110 GHz | WR12 |
| 毫米波谐波下变频器 | R&S®FS-110 | 90 GHz至140 GHz | WR10 |
| 毫米波谐波下变频器 | RPG FS-Z140 | 90 GHz至140 GHz | WR08 |
| 毫米波谐波下变频器 | RPG FS-Z170 | 110 GHz至170 GHz | WR06 |
| 毫米波谐波下变频器 | RPG FS-Z220 | 170 GHz至220 GHz | WR05 |
| 毫米波谐波下变频器 | RPG FS-Z325 | 220 GHz至325 GHz | WR03 |
| 毫米波谐波下变频器 | RPG FS-Z500 | 325 GHz至500 GHz | WR02 |

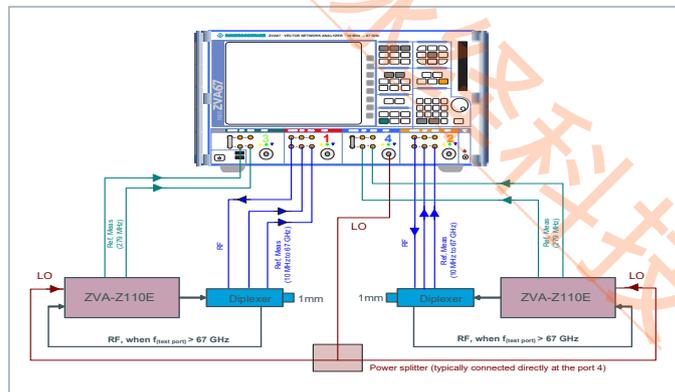
典型的变频损耗为20-40 dB，根据不同的频段和谐波混频器的次数，详细资料可参考技术指标书。在信号分析仪中，集成了自动信号判读软件，分辨由于谐波混频带来的虚假信号成分。



矢量网络分析

毫米波矢量网络分析基于R&S®ZVA24/40/50/67, ZVT20等网络分析仪进行频率扩展。

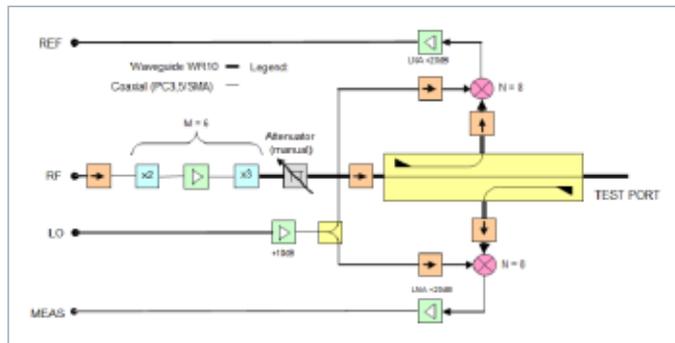
下图详细描述了扩展的原理的实现途径。四端口ZVA67具有4个独立源, ZVA-Z110E是75-110 GHz频率扩展, 双工器对75 GHz与75 GHz-110 GHz信号进行分配。端口4提供本振信号。内置于ZVA中的软件ZVA-K8控制矢量网络分析仪的频率、功率等设置和所有测量配置。



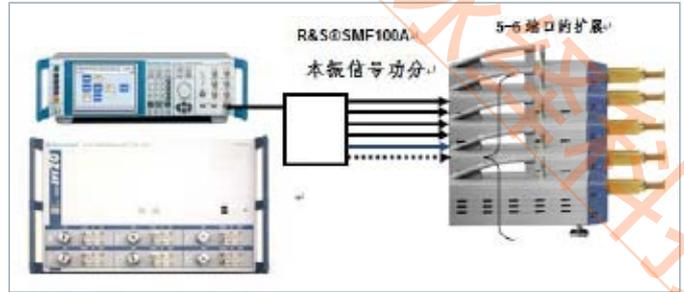
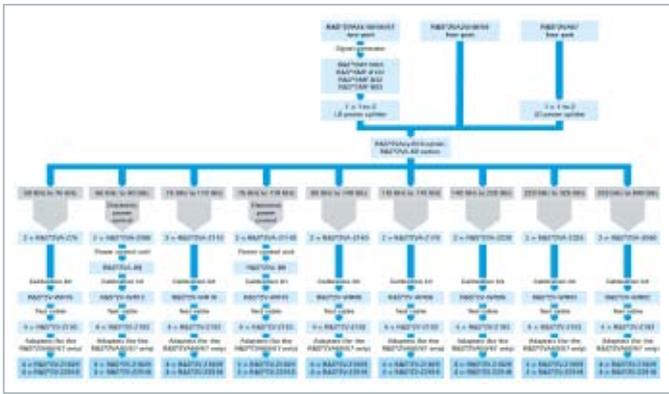
高达500 GHz的毫米波扩展变频器

射频信号通过倍频扩展至高频毫米波信号, 谐波混频器、本振信号及相应的定向耦合器构成参考支路、测量支路。基于R&S矢量网络分析仪ZVA24/40/50/67, 可扩展至500 GHz的变频模块如下所示。

| 型号 | 频率范围 | 输出功率 (dBm) | 动态范围 (dB) | 接口类型 |
|--------------|-----------------|---------------|---------------|------|
| R&S®ZVA-Z75 | 50 GHz~75 GHz | >0, typ.4 | >90, typ.110 | WR15 |
| R&S®ZVA-Z90 | 60 GHz~90 GHz | >6, typ.10 | >100, typ.115 | WR12 |
| R&S®ZVA-Z110 | 75 GHz~110 GHz | >7, typ.10 | >100, typ.110 | WR10 |
| R&S®ZVA-Z140 | 90 GHz~140 GHz | >-1, typ.3 | >85, typ.105 | WR08 |
| R&S®ZC170 | 110 GHz~170 GHz | >+5, typ.+9 | >90, typ.105 | WR06 |
| R&S®ZC220 | 140 GHz~220 GHz | >-2, typ.+2 | >100, typ.115 | WR05 |
| R&S®ZVA-Z220 | 140 GHz~220 GHz | >-14, typ.-10 | >85, typ.105 | WR05 |
| R&S®ZC325 | 220 GHz~325 GHz | >-11, typ.-8 | >100, typ.115 | WR03 |
| R&S®ZVA-Z325 | 220 GHz~325 GHz | >-22, typ.-20 | >80, typ.100 | WR03 |
| R&S®ZC500 | 325 GHz~500 GHz | >-17, typ.-13 | >85, typ.100 | WR02 |
| R&S®ZVA-Z500 | 325 GHz~500 GHz | >-25, typ.-22 | >70, typ.90 | WR02 |



基于R&S矢量网络分析仪R&S®ZVA24/40/50/67，工作频段达到500 GHz的扩展方案配置框图如下。



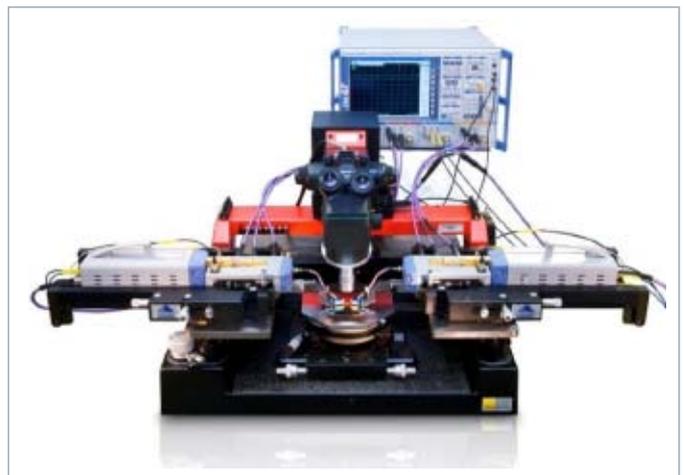
全端口S参数校准

毫米波的部件大多数是波导接口。R&S的毫米波段支持T (直通), S (短路), Offset Short (偏置短路, 在测试端口与短路之间增加四分之一波长波导段), M (匹配, 固定或滑动负载)。



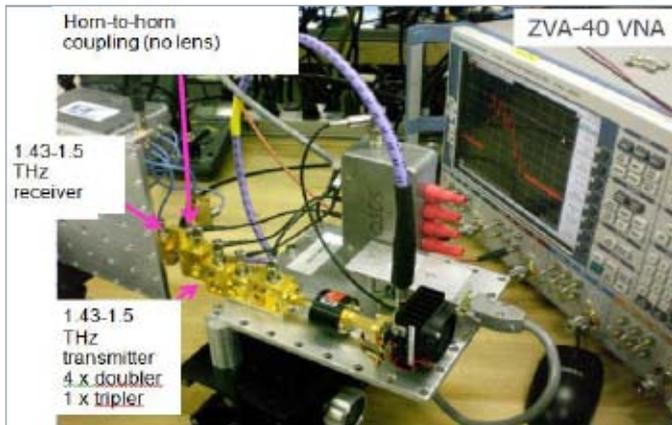
在片测量

兼容Cascade探针台，可以实现毫米波的器件在片测量。Cascade Wincal软件支持矢量网络分析的校准。具体的探针台、探针的配置信息可参考。由于R&S®ZV-Zxx的扩展器采用无风扇的设计，工作过程中无噪声和振动，特别适合探针台及在片测量。



更高频段的扩展

支持 VDI Virginia Diodes Inc (<http://vadiodes.com/>) 矢量网络分析仪的扩展，R&S®ZVA与VDI的扩展，可完成1 THz以上的矢量网络分析。下图描述了基于ZVA40和VDI扩展，完成1.5 THz的矢量网络分析的成功实践。



更多端口的扩展

R&S矢量网络分析仪ZVT20，具有6个测试端口，包含12个接收机和3个独立源，以此为基础，可以实现毫米波5个测试端口的扩展，如果采用信号源R&S®SMF100A/SMB100A及功分器，产生上变频扩展的所需本振信号，实现 6端口毫米波的扩展。可以满足高达500 GHz的6端口器件的全S参数测量的需求。

配置信息

| 名称 | 型号 | 频率范围 |
|-------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| 矢量网络分析仪基本单元 | | |
| 矢量网络分析仪, 4端口, 40 GHz, 2.4 mm | R&S®ZVA40 | 10 MHz至40 GHz |
| 矢量网络分析仪, 4端口, 40 GHz, 2.92 mm | R&S®ZVA40 | 10 MHz至40 GHz |
| 矢量网络分析仪, 4端口, 50 GHz, 2.4 mm | R&S®ZVA50 | 10 MHz至50 GHz |
| 矢量网络分析仪, 4端口, 67 GHz, 1.85 mm | R&S®ZVA67 | 10 MHz至67 GHz |
| 矢量网络分析仪选件 | | |
| 直接发生器/接收机访问接口, 4端口, 40 GHz | R&S®ZVA40-B16 | 10 MHz至40 GHz |
| 直接发生器/接收机访问接口, 4端口, 50 GHz | R&S®ZVA50-B16 | 10 MHz至50 GHz |
| 直接发生器/接收机访问接口, 4端口, 67 GHz | R&S®ZVA67-B16 | 10 MHz至67 GHz |
| 时域 (TDR) | R&S®ZVAB-K2 | |
| 变频器控制软件 | R&S®ZVAB-K8 | |
| 外部衰减器控制 | R&S®ZVAB-B8 | |
| 毫米波频率扩展单元 | | |
| WR15毫米波频率扩展单元 | R&S®ZVA-Z75 | 50 GHz至75 GHz |
| WR12毫米波频率扩展单元 | R&S®ZVA-Z90 | 60 GHz至90 GHz |
| WR10毫米波频率扩展单元 | R&S®ZVA-Z110 | 75 GHz至110 GHz |
| 频谱分析仪基本单元 | | |
| 频谱分析仪, 30/40 GHz | R&S®FSV30/FSV40 | 10Hz至30/40 GHz |
| 频谱分析仪, 30/40 GHz | R&S®FSVA30/FSVA40 | 10 Hz至30/40 GHz |
| 频谱分析仪, 30/40 GHz | R&S®FSVR30/FSVA40 | 10 Hz至30/40 GHz |
| 频谱分析仪, 26.5/43/50/67/85 GHz | R&S®FSW26/43/50/67/85 | 2 Hz至26.5/43/50/67/85 GHz |
| 信号源分析仪, 26.5/50 GHz | R&S®FSWP26/50 | 10 mHz至26.5/50 GHz |
| 毫米波频率扩展单元 | | |
| 毫米波谐波下变频器 | R&S®FS-Z60 | 40 GHz至60 GHz |
| 毫米波谐波下变频器 | R&S®FS-Z75 | 50 GHz至75 GHz |
| 毫米波谐波下变频器 | R&S® FS-Z90 | 75 GHz至110 GHz |
| 毫米波谐波下变频器 | R&S® FS-110 | 90 GHz至140 GHz |
| 毫米波谐波下变频器 | RPG FS-Z140 | 90 GHz至140 GHz |
| 毫米波谐波下变频器 | RPG FS-Z170 | 110 GHz至170 GHz |
| 毫米波谐波下变频器 | RPG FS-Z220 | 170 GHz至220 GHz |
| 毫米波谐波下变频器 | RPG FS-Z325 | 220 GHz至325 GHz |
| 毫米波谐波下变频器 | RPG FS-Z500 | 325 GHz至500 GHz |
| 信号源基本单元 | | |
| 微波信号源, 22/31.8/43.5 GHz | R&S®SMF100A | 100 kHz至22/31.8/43.5 GHz |
| 毫米波频率扩展单元 | | |
| 毫米波倍频器 | R&S®SMZ75 | 50 GHz至75 GHz |
| 选配机械衰减器 | R&S®SMZ-B75M | 50 GHz至75 GHz |
| 选配电子衰减器 | R&S®SMZ-B75E | 50 GHz至75 GHz |
| 毫米波倍频器 | R&S®SMZ90 | 60 GHz至90 GHz |
| 选配机械衰减器 | R&S®SMZ-B90M | 60 GHz至90 GHz |
| 选配电子衰减器 | R&S®SMZ-B90E | 60 GHz至90 GHz |
| 毫米波倍频器 | R&S®SMZ110 | 75 GHz至110 GHz |
| 选配机械衰减器 | R&S®SMZ-B110M | 75 GHz至110 GHz |
| 选配电子衰减器 | R&S®SMZ-B110E | 75 GHz至110 GHz |
| 毫米波倍频器 | R&S®SMZ170 | 110 GHz至170 GHz |

三 射频在片测试平台

背景

在片射频测量是指使用探针直接测量晶圆 (Wafer) 或裸芯片 (Chip) 的射频参数。相比于常规的键合/封装后的测量，在片射频测量消除了封装及键合丝引入的寄生参数，可以更准确的反应被测芯片的射频特性。在片射频测量广泛应用于器件建模、芯片检验等领域。

本文档介绍在片射频测量方案、探针台及其附件以及校准方法等。

在片射频测量

在片射频测量系统：

在片射频测量系统一般由射频/微波测量仪器和探针台及附件组成。



图1 典型的在片S参数测量系统

在片射频测量系统中，探针台和探针用于芯片测量端口与射频测量仪器端口（同轴或波导）之间的适配；射频测量仪器完成各项所需的射频测量。

探针台系统：

探针台系统由主机台、探针、微定位器等组成。

主机台：

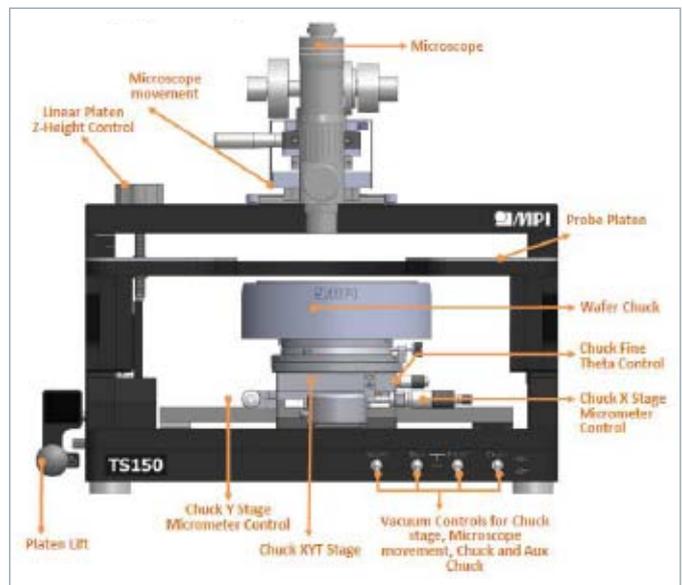
按照操作方式的不同，主机台可以分为手动机台和自动机台。手动机台的所有操作均需手动完成，适合实验室及小批量测试；自动机台可以自动进出晶圆 (Wafer) 及可编程自动定位、测量，适用于大批量测试。

主机台一般包括显微镜及显示、探针平台、晶圆/芯片载台 (Chuck) 及减震台 (可选) 等。

显微镜及显示系统用于观察待测芯片及确认探针与芯片接触，可采用通过目镜观察或通过CCD镜头连接显示器观察。显微镜可延X、Y、Z在一定范围内移动，X、Y轴方向一般通过机械方式移动，Z轴方向可通过机械或气动方式移动。



a 手动机台与自动机台



b 主机台主要部件
图2主机台

探针平台用于放置微定位器，该平台可整体延Z轴方向移动。

晶圆/芯片载台 (Chuck) 可以以真空的方式吸附待测晶圆或芯片，可延X、Y、Z轴方向移动，并可旋转一定角度。

减震台一般为气动减震，可降低震动对测试的影响。

手动机台和自动机台都可以加装高低温测试系统。

■ 微定位器：

微定位器可采用螺钉固定或磁性固定方式放置于探针平台上，可操作探针在X、Y、Z轴方向移动，对于亚毫米波/太赫兹波测试，微定位器还需要带动频率扩展模块一起移动。



图3 各种微定位器



图4 适用于频率扩展模块的微定位器

■ 射频探针：

射频探针的本质为适配器，将芯片测量接口转为同轴或波导端口。常见的射频探针有GSG型、GS型、GSSG型等。射频探针的主要参数有最高工作频率、探针针尖距 (Pitch) 等。

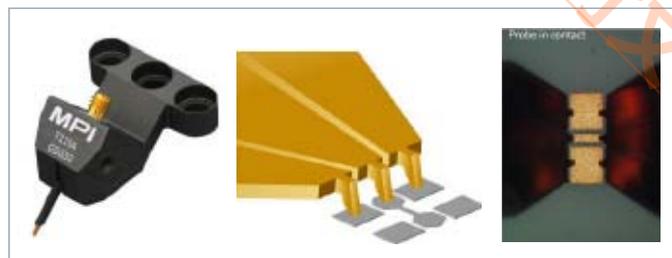


图5 典型GSG探针

■ 校准：

在片射频测试的校准主要是指S参数校准，可以通过使用校准片完成校准。一般的校准片提供开路 (Open)、短路 (Short)、匹配 (Match)、直通 (Through) 和直线 (Line) 标准件，可完成TOSM校准或TRL校准。

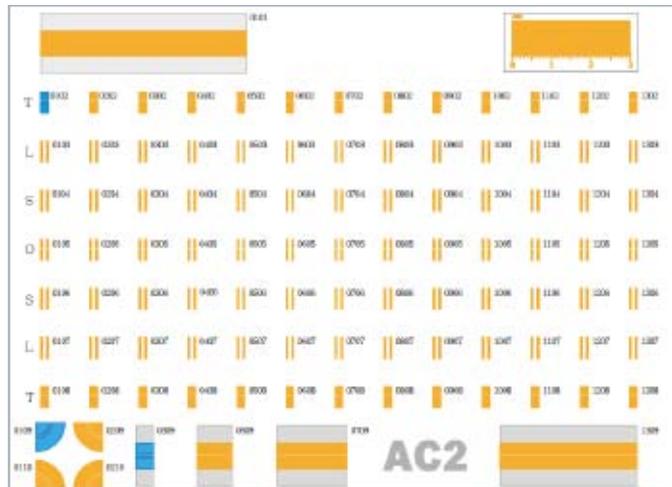


图6 典型GSG校准片

一般的校准可以通过专用的校准软件完成：

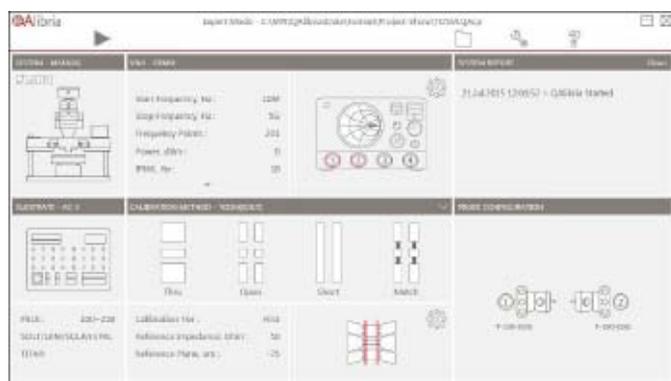


图7 校准软件

对于特殊的校准，可以利用厂家提供的标准件参数，在矢量网络分析仪中编辑校准件，完成校准。

配置信息

| 矢量网络分析仪基本单元 | |
|--------------------|------------|
| R&S®ZVA | 矢量网络分析仪 |
| 探针台主机台 | |
| MPI®手动探针台 | |
| MPI®自动探针台 | |
| Cascade®手动探针台 | |
| Cascade®自动探针台 | |
| 微定位器 | |
| MPI®微定位器 | |
| Cascade®微定位器 | |
| 射频探针 | |
| MPI®Titan系列 | DC-110 GHz |
| Cascade®ACP系列 | DC-110 GHz |
| Cascade®Infinity系列 | DC-500 GHz |
| 校准软件 | |
| MPI®QAlibria | |
| Cascade®Wincal | XE |

四 负载牵引测试平台

背景

源/负载牵引测量是与输入/输出阻抗相关的测量。通过改变源/负载阻抗，测量输入功率、输出功率、功率附加效率、杂散、噪声系数、EVM、ACPR等参数，得到该参数与输入/输出阻抗的关系。源/负载牵引测量为大功率、高效率、强非线性或低噪声器件的建模和设计提供了依据。

基于R&S矢量网络分析仪、频谱仪、信号源、功率计与Focus Microwave的各种阻抗调谐器及相应分析软件的解决方案，广泛应用于移动通信、航空航天/国防、通用电子器件等领域。

本文档介绍源/负载牵引测量的基本原理及测量系统配置。

源/负载牵引测量

常见的源/负载牵引测量：

源/负载牵引功率测量

对于非线性器件，如高功率放大器、高功率晶体管（场效应管）等，其源阻抗也具有非线性，且与负载阻抗有关。不能使用固定负载阻抗进行源阻抗测量。同样的，负载阻抗特性与源阻抗亦相关，不能采用固定负载阻抗（如50欧姆）进行源阻抗特性的测量。

源/负载牵引功率测量中，待测件的源/负载阻抗可通过Tuner设置，从而得到待测件在不同源/负载阻抗条件下的输出功率等参数。源/负载牵引测量在大功率、高效率功率器件建模和设计中被广泛采用。

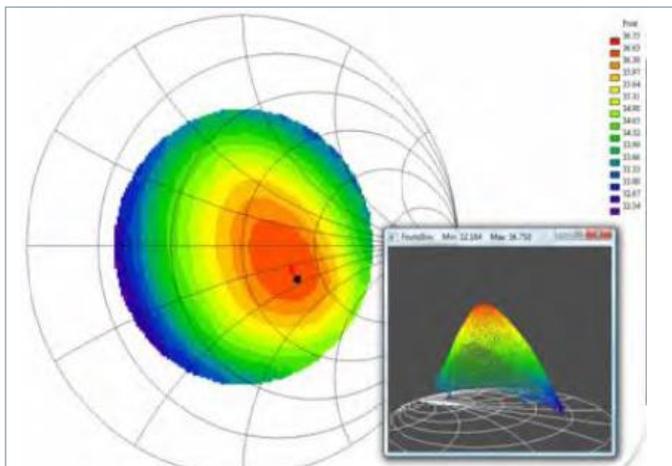


图1 典型的源/负载牵引功率测量结果

噪声参数测量：

一个二端口网络的噪声系数与源阻抗有关，根据H.Rothe和W.Dahlke提出的二端口网络的Rn-Gn噪声模型，推导出二端口噪声网络的噪声系数可表示为：

$$F = F_{\text{Min}} + \frac{R_n}{G_s} \left[(G_s - G_{\text{opt}})^2 + (B_s - B_{\text{opt}})^2 \right]$$

式中，F为二端口噪声网络噪声系数， F_{Min} 为最小噪声系数， R_n 为等效噪声电阻， G_{opt} 为最佳源电导， B_{opt} 为最佳源电纳， G_s 为源电导， B_s 为源电纳。其中 F_{Min} 、 R_n 、 G_{opt} 和 B_{opt} 称为噪声参数，完全取决于二端口网络自身的噪声特性，与该网络工作状态和工作频率有关，而与外电路无关。

当输入端的源导纳 $Y_s = G_s + jB_s = G_{\text{opt}} + jB_{\text{opt}}$ 时，整个网络得到最佳噪声系数 F_{Min} 。从上式还可以看出，等噪声系数曲线是以 $(G_{\text{opt}}, jB_{\text{opt}})$ 为圆心的一组圆。

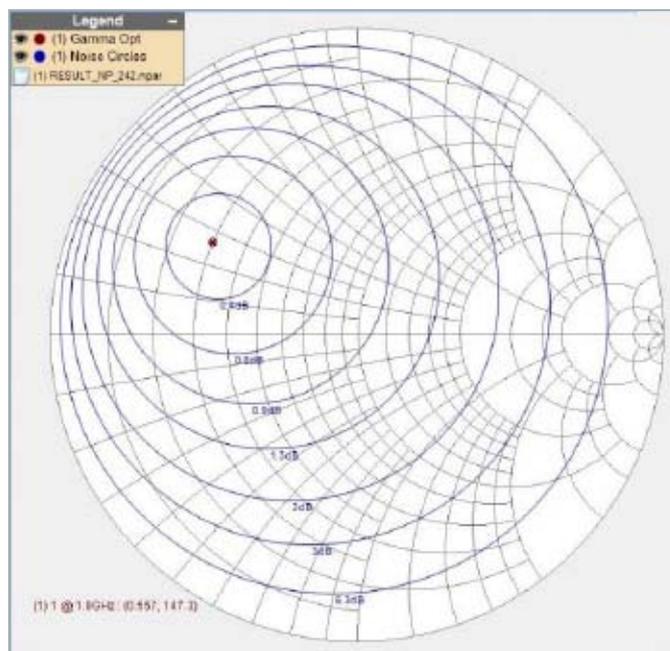


图2 噪声参数

从二端口噪声网络的噪声系数公式可以看出，通过测量四个不同源阻抗条件下的噪声系数，即可计算出四个噪声参数。实际测量中往往会测量较多的阻抗条件，利用统计方法计算噪声参数。

噪声参数测量中一般只使用源Tuner，用于产生不同的源阻抗，噪声系数的测量可以采用信噪比法、Y因子法和冷源法等方法。由于各种方法测量的都是包含Tuner的级联噪声系数，因此在数据处理中需要根据级联噪声系数公式，计算待测件在该阻抗下的噪声系数。

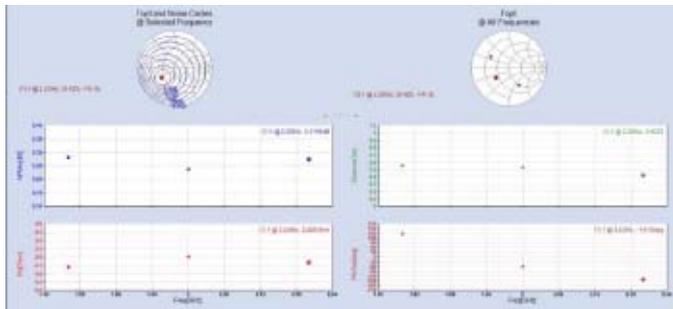


图2 典型噪声参数测量结果

源/负载牵引测量系统

基于ZVA矢量网络分析仪的负载牵引测量系统

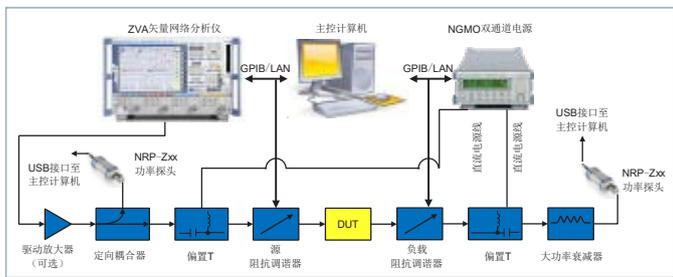


图3 基于ZVA矢量网络分析仪的负载牵引测量系统

基于ZVA矢量网络分析仪的传统负载牵引测量系统中，ZVA矢量网络分析仪用于Tuner校准并在测量中作为信号源使用。由于ZVA矢量网络分析仪采用多源结构，该系统可以很方便的扩展为双音测量系统。

NRP-Zxx系列功率探头使用方便，可通过USB接口连接到主控计算机或ZVA矢量网络分析仪，用于测量待测件的输入输出功率。

源/负载阻抗调谐器采用Focus®CCMT系列阻抗调谐器，实现负载阻抗变化。

在此系统基础上，可以扩展出多种测量系统：

■ 谐波负载牵引测量系统：

如何提高功率放大器的效率是设计师十分关心的问题。最近几年，谐波负载牵引测量系统被越来越多的功放设计师接受

和认可。功率放大器设计时谐波阻抗匹配能够在很大程度上提高功率附加效率。以二次谐波阻抗为例，在二次谐波反射系数幅度固定条件下，相位的改变可引起约10%左右的效率变化。

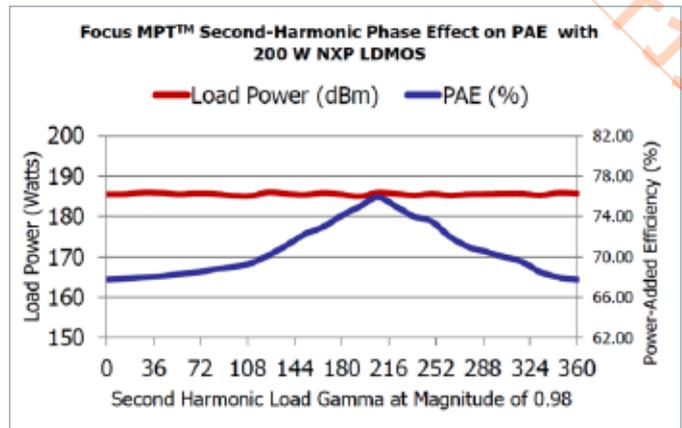


图3 二次谐波处的阻抗相位对PAE的影响。

在图3所示的系统中，将负载端的阻抗调谐器升级为谐波阻抗调谐器即可实现谐波负载牵引测量系统。

■ 脉冲负载牵引测量系统

功率放大器往往需要在脉冲条件下测量。一方面这一类功率放大器通常不能用于连续工作，加电时间过长会造成损坏；另一方面只有在真实的工作条件下，才能准确反映器件的性能。

使用R&S® ZVAX-TRM 矢量网络分析仪扩展单元和Focus®GatePulser模块，可以很方便地完成脉冲负载牵引测量



图4 脉冲负载牵引测量系统所需附件

■ 在片负载牵引系统

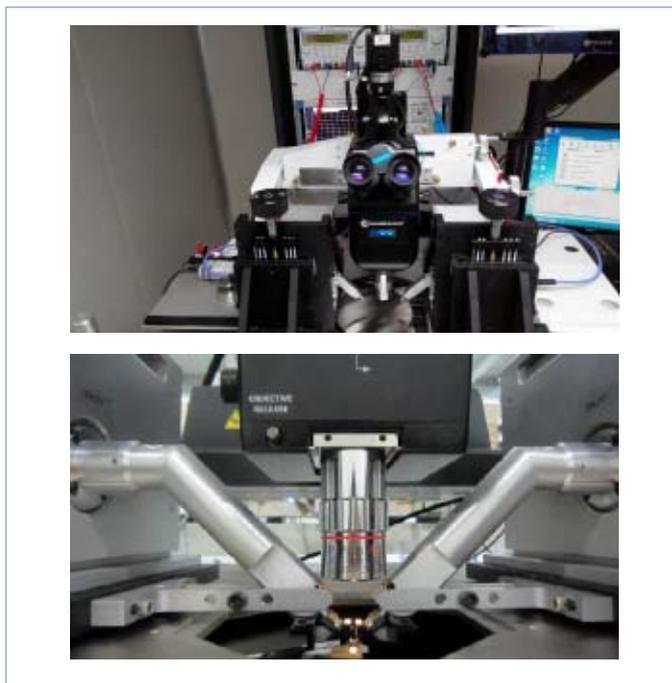


图5 在片负载牵引测量系统

现代无线系统都在追求小型化，因此在片器件测量和设计越来越受到重视。对于在片负载牵引系统，探针及连接探针的电缆在很大程度上减小了Tuner的阻抗调谐范围。为此Focus®公司采用Bend-line空气线与探针做硬连接，并可增加预匹配配件，从而提高Tuner的最大反射系数。

■ 矢量接收机负载牵引系统

在传统负载牵引系统中，待测件输入阻抗是未知的，需要通过调整源阻抗调谐器实现输入端最大功率传输，而由于阻抗误差造成的失配以及不同功率下待测件输入阻抗的变化会给测量带来较大的误差。基于矢量网络分析仪的矢量接收机负载牵引系统中，可以实时测量待测件的输入输出功率及源端、负载端的反射功率，使测量更加准确。利用R&S®ZVA-B16选件，可以很方便的搭建矢量接收机负载牵引系统。

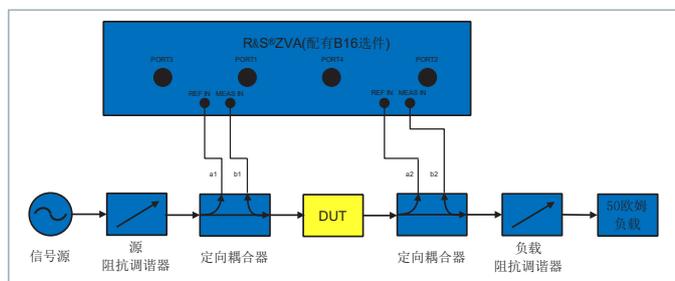


图6 矢量接收机负载牵引测量系统

■ 混合型 (Hybrid) 负载牵引系统

毫米波段测量、在片测量等应用中，电缆、探针等损耗会减小Tuner的阻抗调谐范围，传统的纯机械式负载牵引系统无法满足客户的需求，混合型负载牵引系统可以很好的解决这个问题。混合型负载牵引系统以矢量接收机负载牵引系统为基础，采用机械式Tuner调谐与有源负载牵引结合，在基波频率上增加有源负载牵引功能。由于基波上有机械Tuner做预匹配，因此不需要大功率反向放大器。谐波阻抗调谐使用机械Tuner实现。

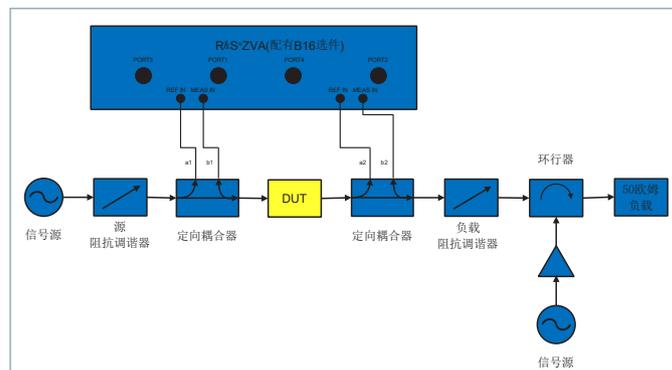


图7 混合型负载牵引测量系统

基于ZVA矢量网络分析仪的噪声参数测量系统：

利用ZVA矢量网络分析仪的R&S®ZVAB-K30选件，使用单台仪表与Tuner配合，即可完成噪声参数测量。

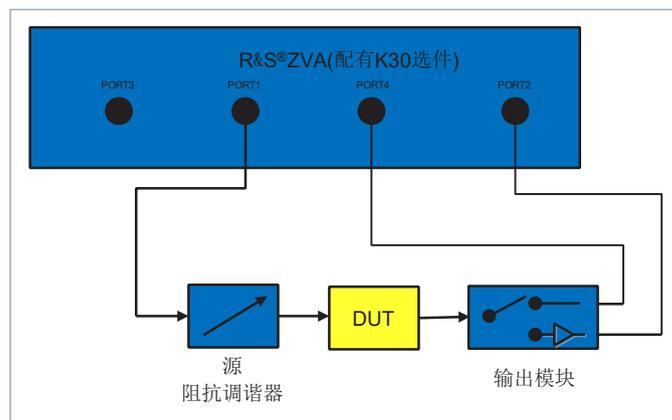


图8 基于ZVA矢量网络分析仪的噪声参数测量系统

源阻抗调谐器采用Focus®CCMT系列阻抗调谐器，实现源阻抗变化。输出模块 (Output Noise Module) 为可选配置，内置低噪声放大器和切换开关，可提高系统测量超低噪声器件的能力。

手机终端测量负载牵引测量系统:

Tuner可以用来模拟手机天线阻抗幅度和相位的变化。结合手机综测仪，可以验证手机在不同阻抗下的收发性能，从而根据发射功率、接收机灵敏度、ACPR及直流电流等参数优化手机设计。

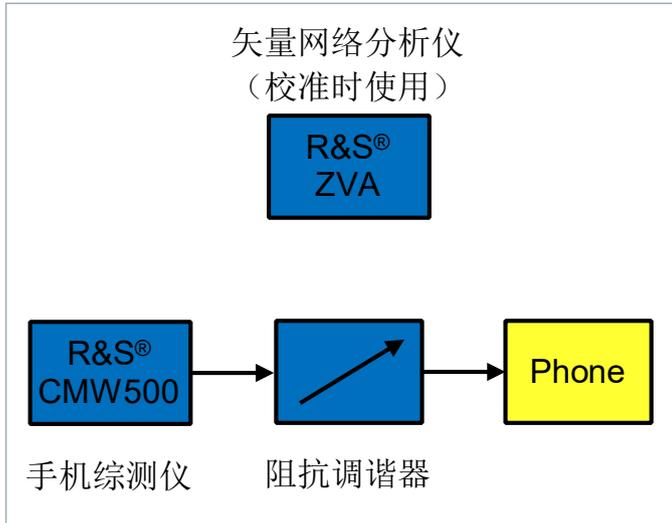


图9 手机终端负载牵引测量系统

配置信息

| 矢量网络分析仪基本单元 | |
|-------------------|---|
| R&S®ZVA | 矢量网络分析仪 |
| 校准件 | |
| R&S®ZV-Z53 | 300 kHz 到3 GHz |
| R&S®ZV-Z54 | 10 MHz 到40 GHz |
| R&S®ZV-Z55 | 10 MHz 到50 GHz |
| 阻抗调谐器 (Turner) | |
| Focus®CCMT基波阻抗调谐器 | 0.4-18 GHz、2-40 GHz、 2-50 GHz、8-65 GHz |
| Focus®MPT谐波阻抗调谐器 | 0.8-18 GHz、2-36 GHz、 3-40 GHz、8-50 GHz |
| 测量软件 | |
| FDCS负载牵引测量软件 | |

五 非线性测试平台

背景

大功率器件是射频和微波通信系统中核心的组成部分，手机、基站和卫星通信系统中都会用到大功率放大器，表征这些大功率器件的线性和非线性特性是产品设计和验证过程中非常关键的环节。为此，多家公司推出了基于多谐波失真模型（Polyharmonic Distortion Modelling，简称PHD）的非线性模型。这些模型都是对小信号S参数在大信号激励下的数学扩展，能够精确地仿真出各种射频参数，如：输出功率、附加效率、增益压缩、动态负载线等。

本文档介绍非线性测量的基本原理及Cardiff模型，包括简化模型（Cardiff Model Lite）和完整模型（Cardiff Model Plus）、基于测量的建模方法和模型使用。

非线性模型

多谐波失真模型

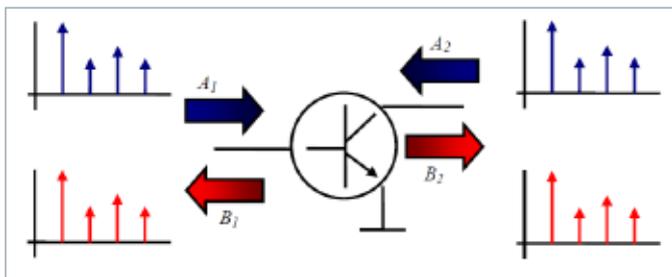


图1 多谐波失真模型

多谐波失真模型是一种频域行为模型，其主要思想是通过测量被测器件输出端的信号特性，在频域分析其与输入信号各次谐波之间的关系来描述被测器件的特性。

如图1所示 A_1 为大信号激励信号； B_1 为入射端的反射信号； B_2 为输出端的响应信号； A_2 为由于负载不匹配再次反射到被测件的激励信号。 A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 都包含基波和谐波成分。为了表征被测器件的非线性，需要测量每一个基波和谐波的幅度和相位，以及相互之间的激励-响应关系：

$$B_{1k} = F_{1k}(DC, A_{11}, A_{12}, A_{13}, \dots, A_{21}, A_{22}, A_{23}, \dots)$$

$$B_{2k} = F_{2k}(DC, A_{11}, A_{12}, A_{13}, \dots, A_{21}, A_{22}, A_{23}, \dots)$$

式中： A_{ph} 代表非线性激励信号，下标 p 表示测量端口，下标 h 表示谐波次数； B_{ph} 代表非线性响应信号，下标 p 表示测量端口，下标 h 表示谐波次数。

Mesuro公司Cardiff Model系列就是基于多谐波失真模型的一种商用解决方案。

Cardiff模型

Cardiff模型由英国Cardiff大学（Cardiff University）Tasker, P.J教授提出并实现，分为简化版的Cardiff Model Lite和完整版的Cardiff Model Plus。

Cardiff Model Lite

Cardiff Model Lite基于多谐波失真模型的三阶多项式展开式和谐波叠加原理，允许在大信号激励情况下扩展S参数。

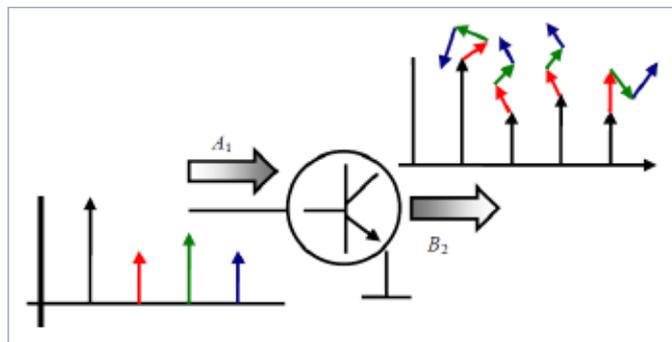


图2 谐波叠加原理

谐波叠加原理如上图所示。首先假设激励信号只存在 A_{11} 分量，此时输入频谱 A_{11} 和其响应输出频谱 B_{2n} 各分量在图中用黑色线表示；接着，保持 A_{11} 分量不变，另加入一个相对较小的分量 A_{12} （二次谐波），它在 B_2 上产生的偏移量用红色线表示；以此类推，三次谐波和四次谐波分量在 B_2 上产生的偏移量分别用绿色和蓝色线表示。按照谐波叠加原理， B_2 各分量上的偏移量均是由各谐波偏移量的线性叠加产生的。经实验验证，在射频功率放大器中，这种分析是成立的。

在Cardiff Model Lite建模中，DUT首先由基波 A_{11} 驱动，在每个基波输入功率下，也会同时在各谐波频率下加入一个小信号 A_{ph} 对器件进行扰动。小信号可由矢量网络分析仪中的第二个源实现，此信号源的相位通过至少6个不同的相位点进行扫描，以使模型正确的预测器件性能。

Cardiff Model Lite的测量系统由R&S®ZVA系列矢量网络分析仪和Mesuro公司的MB-MG信号调理单元及非线性模型提取软件组成：

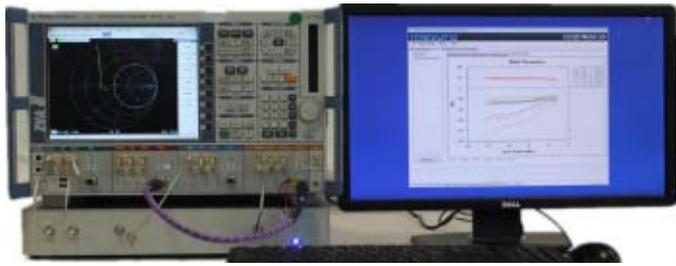


图3 Cardiff Model Lite测量系统

R&S®ZVA系列矢量网络分析仪用于产生基波和谐波激励信号，并测量响应信号与激励信号的相对幅度和相位。MB-MG信号调理单元中包含用于校准谐波相位的相位参考单元及射频信号路由模块。

Cardiff Model Lite模型为局部模型，《仅适用于在以下特定的条件下预测器件的性能：

- $A_{21} \ll A_{11}$
- $Z_L \approx 50 \Omega$

Cardiff Model Plus

Cardiff Model Plus是基于PHD模型的一个更精确、更多阶多项式展开的非线性建模技术，不再使用谐波叠加原理，也就是不再考虑激励谐波分量相对于大信号工作点相应的线性扰动关系，而需要考虑各谐波分量之间的相互混合阶数分量对输出波的影响。Cardiff Model Plus模型的数学表达式为：

$$b_{p,h} = p^h \cdot f(|a_1|, |a_2|, (Q/P)) = p^h \cdot \sum_{m=-(N+1/2)}^{m=(N+1/2)} \left\{ K_{p,h,m} \left(\frac{Q}{P} \right)^m \right\}$$

其中：

$$K_{p,h,m} = g(|a_1|, |a_2|)$$

式中， a_1 是输入端的大信号激励信号，建立大信号工作点； a_2 是输出端的输出信号再反射到端口的基波激励信号； P^h 是 a_1 的第 h 阶分量的相位， Q 是 a_2 的相位分量； N 代表多项式展开的阶数。实验表明，多项式展开阶数越多，误差越小，但当阶数在6-8阶范围内，误差变化不大。对于功率器件的非线性大信号模型而言，该模型完全满足射频设计的需求。

Cardiff Model Plus测量系统如下图所示：

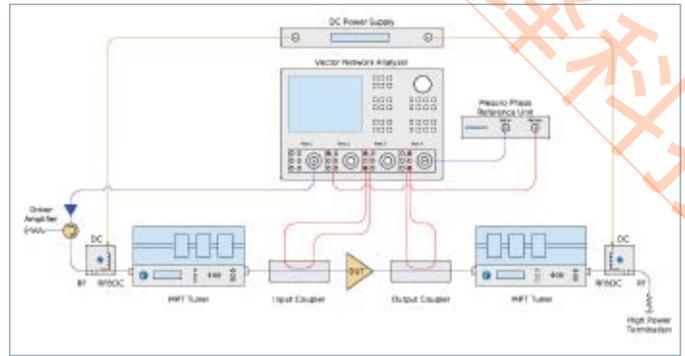


图4 Cardiff Model Plus测量系统

Cardiff Model Plus测量系统是基于传统的负载牵引系统的一个升级，由传统的功率测量模式改为基于矢量网络分析仪矢量接收机的测量模式。该测量系统由R&S®ZVA系列矢量网络分析仪、Focus®源/负载阻抗调谐器 (Turner)、Mesuro相位参考单元、定向耦合器、Bias Tee、驱动放大器等附件和非线性模型提取软件组成。矢量网络分析仪用于测量 a_1 ， b_1 ， a_2 ， b_2 ，及相位参考单元的的参考相位；阻抗调谐器 (Turner)用于改变DUT的源/负载阻抗，相位参考单元用于校准谐波之间的相对相位。

Cardiff Model Plus的优点有：

- 在失配条件下有很高的精度
- 可以很好的预测负载牵引测量区域以外的性能
- 模型文件远小于其他商用PHD模型。

Cardiff模型的使用与验证

Cardiff Model Lite测量系统和Cardiff Model Plus测量系统均可自动生成模型文件，支持主流的EDA软件，如AWR Microwave office、Keysight Advanced Design System等。

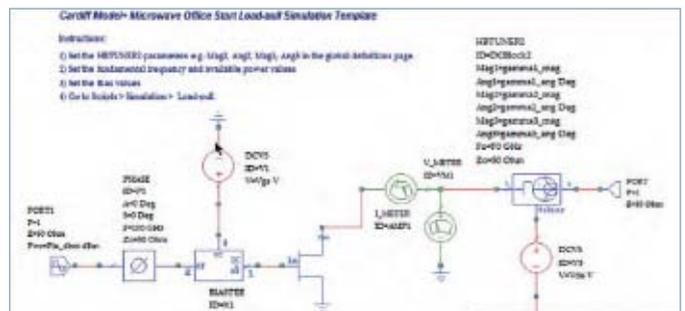


图5 在EDA软件中使用Cardiff 模型

结果表明，Cardiff模型具有较高的精度：

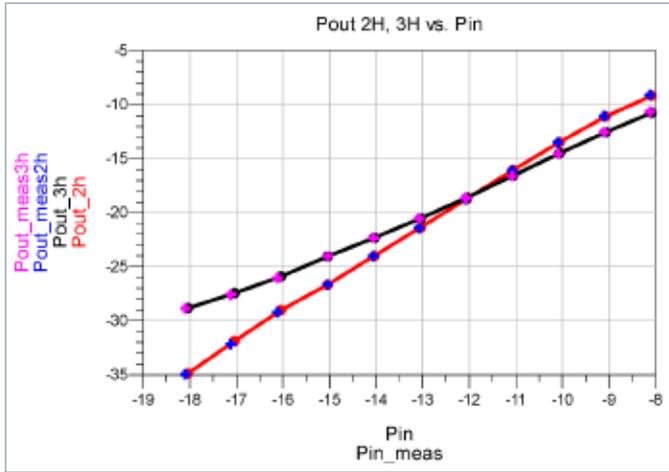


图6 Cardiff Model Lite模型仿真结果与实测结果比较

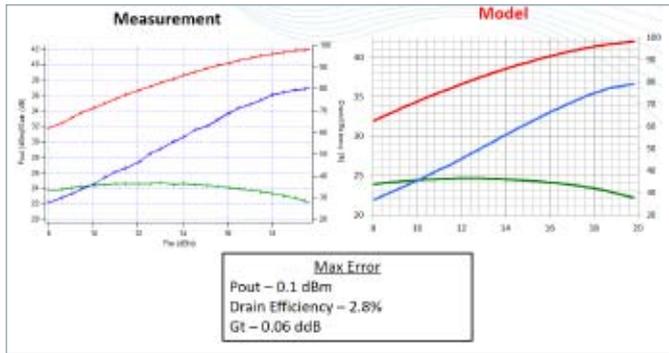


图7 Cardiff Model Plus模型仿真结果与实测结果比较

配置信息

| | |
|-----------------------|---|
| 矢量网络分析仪基本单元 | |
| R&S®ZVA | 矢量网络分析仪 |
| 校准件 | |
| R&S®ZV-Z53 | 300 kHz 到3 GHz |
| R&S®ZV-Z54 | 10 MHz 到40 GHz |
| R&S®ZV-Z55 | 10 MHz 到50 GHz |
| 阻抗调谐器 (Turner) | |
| Focus®CCMT基波阻抗调谐器 | 0.4-18 GHz、2-40 GHz、 2-50 GHz、8-65 GHz |
| Focus®MPT谐波阻抗调谐器 | 0.8-18 GHz、2-36 GHz、 3-40 GHz、8-50 GHz |
| 相位参考单元 | |
| Mesuro相位参考单元 | 10 MHz-30/50/67 GHz |
| 测量软件 | |
| FDCS负载牵引测量软件 | |
| MW-MGL模型提取软件 | Cardiff Model Lite模型提取 |
| MW-MGP模型提取软件 | Cardiff Model Plus模型提取 |

六 多端口收发组件测试平台

测试系统建立的必要性

TRM (收发组件) 是构成有源相位控制阵列天线的基本单元。TRM的原理框图如下图1所示。

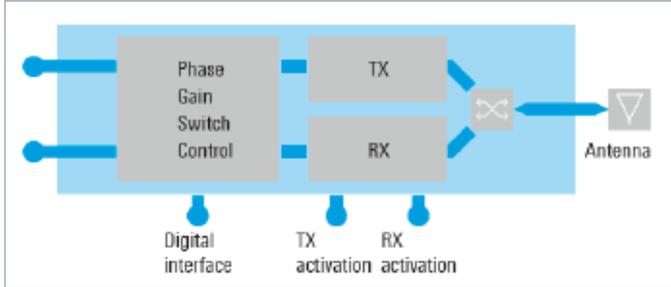


图1 TRM原理框图

如上图1所示，TRM中包括了接收和发射两条射频链路，以及驱动单元和控制接口部分。

依据TRM的输入、输出频率关系，可分为非变频和变频两类。对于测试系统来说，前者测试以矢量网络分析仪为主，进行频率或功率扫描测量；后者需要配置变频测量的功能，包括矢网内置的变频幅相测试的软件、参考混频器附件以及特有的混频器测试校准流程。

TRM测试包括的主要参数如下：

信息读入

- IDN串号读入
- EEPROM编程
- 传感器温度

接收路主要测试参数

- 传输与反射 (S参数)
- 全衰减状态值
- 全相位状态值
- 噪声系数
- 互调失真
- 本振-中频隔离度 (变频体制)
- 通道间隔度

发射路主要测试参数

- 脉冲S参数
- 饱和功率输出
- 脉冲时域参数
- 全衰减状态值
- 全相位状态值
- 压缩点测试
- AM/PM

- 杂散
- 本振-射频隔离度 (变频体制)
- 通道间隔度

在TRM的研制过程中，需要进行两个层次的测试：研发阶段的特性测试和生产阶段的验证测试。特性测试侧重TRM的全状态测试，用于优化和验证TRM的原型设计以及各参数之间调整后的影响，包括衰减、移相的全状态测试在内的，总共约25000个测试值（以6位移相/衰减单元为例）；验证测试侧重成熟产品在产线上的测试，为部分状态测试，总共约2500个测试值。如果依靠分离测试仪表，集成度低，测试速度较慢，难以满足研发、调试和生产阶段的测试任务。

为满足上述测试要求，同时考虑到TRM测试的特定要求（单次连接全参数测试、多状态位射频测试、多线制控制接口、多通道并行测试），测试系统应以标准仪表为基础，外置满足功率要求以及收发链路可控切换的射频箱，提供产生视频控制信号并可调整测试时序的逻辑单元，以及控制计算机和测试软件。

R&S® TS6710主要构成

根据以上测试任务的要求，测试系统R&S®TS6710主要包括矢量网络分析仪ZVA、程控射频箱OSP-TRM、标准PXI视频控制信号单元TVSP和相关测控软件，可完成TRM的测试。此外系统预留了监测端口，便于借助宽带信号分析仪FSW来监测被测件宽带的频谱特性。系统原理框图见下图2所示。

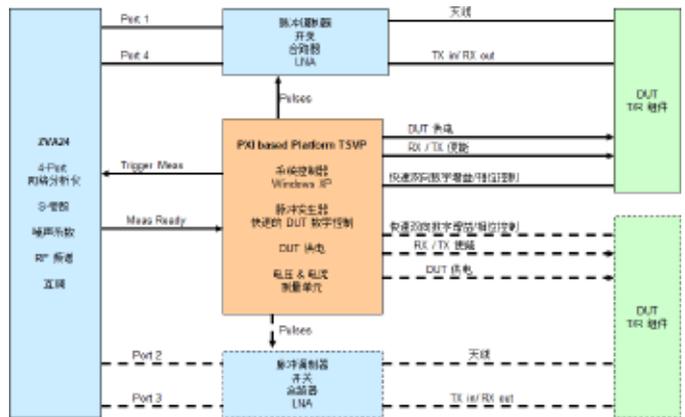


图2 TRM综合测试系统原理框图

如图2所示，TS6710的射频测试部分以矢量网络分析仪ZVA24为一体化测试仪表，完成包括噪声系数和S参数测量等在内的全部测试功能；程控射频箱OSP-TRM完成收发链路的自动切换、信号调制与合成，以及功率控制等功能，保证小信号和大功率信号测试时系统的精确测试和安全；基于PXI的TSVP提供视频控制的信号，包括系统触发、电源控制

和参数测量、高速双向数字控制信号等功能单元。系统还预留了监测端口，便于其它设备对测试系统的信号监测。

测试系统外形见下图3所示。

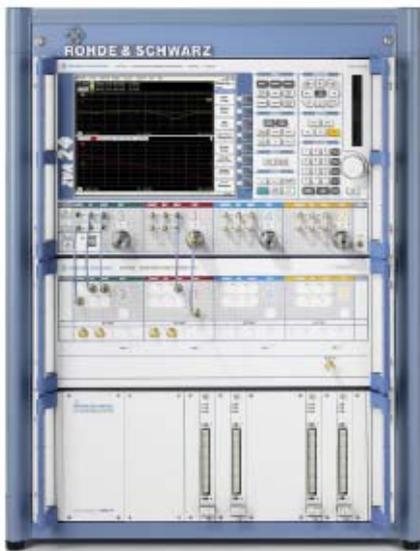


图3 典型测试系统外形图

系统各部分的功能和原理

ZVA射频参数测量

- 接收支路S参数测试
传输和反射S参数测量。
- 噪声系数测试

与传统的Y因子法不同，ZVA的噪声系数测量利用其测量接收机数字部分的双通道结构，并行使用两种检波算法：均方根值 (RMS) 和平均值 (AVG) 检波。如图3所示。

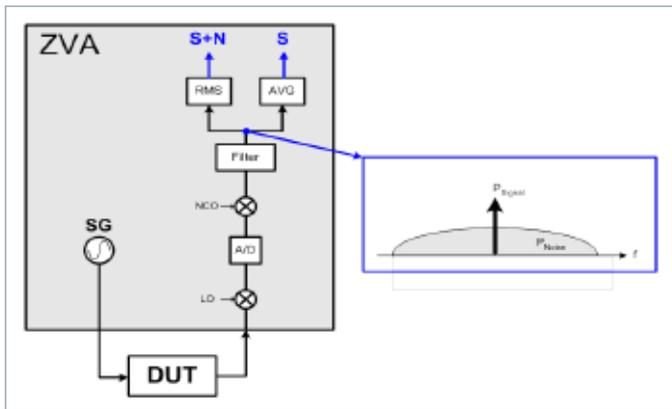


图4 ZVA-K30噪声系数测量原理

- 均方根值 (RMS) 检波算法如下式：

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N u_i^2}$$

由N个采样点计算有效电压，得到信号加噪声的电压。

- 平均值 (AVG) 检波算法如下式：

$$U_{AVG} = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N u_i$$

由N个采样点计算线性平均值电压，如果采样点足够多，AVG检波器仅得到信号电压，噪声部分在计算中被抑制了。

ZVA的噪声系数测量法可结合S参数矢量误差校准使用，改善因端口失配误差。并且不需要使用噪声源，避免了噪声源在被测件作为负载时的ENR参数偏离误差。下图5为低噪声的噪声系数实测结果。



图5 ZVA噪声系数的测试结果

互调测试

四端口ZVA具有独立的双信号源，可产生双音信号，与OSP-TRM射频箱中的合路器配合，可完成互调测试。ZVA的中频滤波器有两个模式，普通模式和高选择性模式。此项测试选择高选择性模式，可得到近70 dB的抑制度，减小迹线噪声和临近频谱的干扰。

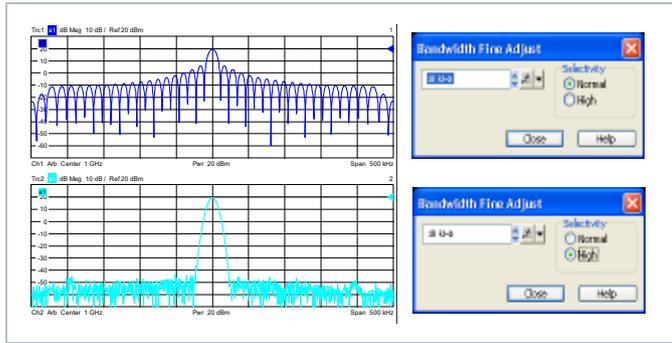


图6 ZVA互调测试时选择接收机中频滤波器为高抑制度模式

Tx脉冲S参数测试

ZVA进行脉冲S参数测量时，采用脉内取点测量法。使用调制脉冲的上升沿作触发，分别控制信号源扫描和接收机采样。这样ZVA每收到一个触发沿，即触发信号源进行频率(或功率)扫描，而接收机在经过触发延迟 τ 后，开始对射频脉冲采样，并进行幅度或相位的S参数测量。每一次触发都会输出一个测量数据，直到扫描到设置的最大频率(功率)值。

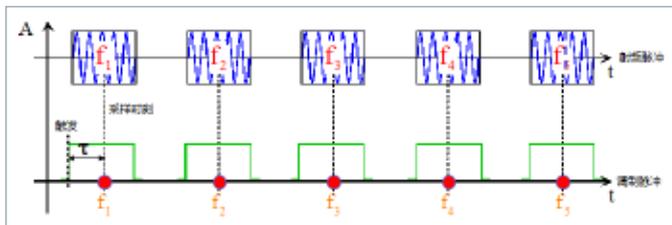


图7 ZVA采用脉内取点法测试脉冲S参数

饱和功率测试

在功率扫描条件下，测量DUT输出信号的绝对功率值。需要测前功率校准。

压缩点测试(功率扫描)

在功率扫描条件下，对选定的信号压缩量值处，测量DUT输出信号的绝对功率值。需要测前功率校准。

AM-PM

在频率扫描条件下，对衰减器不同衰减量条件下对相位状态进行测量；或当移相器在不同相位条件下的衰减状态测量。

脉冲时域参数测试

ZVA的脉冲波形测试方法不同于传统的脉冲“切片”法。

ZVA的接收内设置了额外的快速存储单元(Ram)，见图8，将来不及处理的采样数据存下来，存储时长3 ms(可扩展至25 ms)。在触发信号作用下进行后端信号处理并显示。这样不会因脉冲占空比影响而损失系统的动态范围，并且不会损失信号的时间分辨率，而是完整地把所有采样数据进行处理并显示，测试结构显示了脉冲的真实信息。在采样时钟80 MHz时，数据点的时间分辨率达到为12.5 ns。

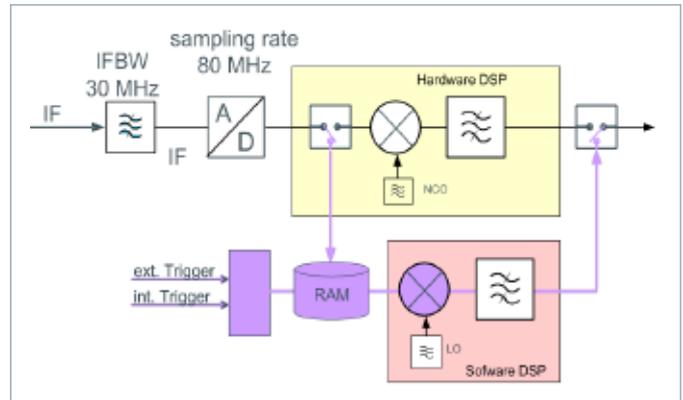


图8 ZVA脉冲时域参数测试硬件框图

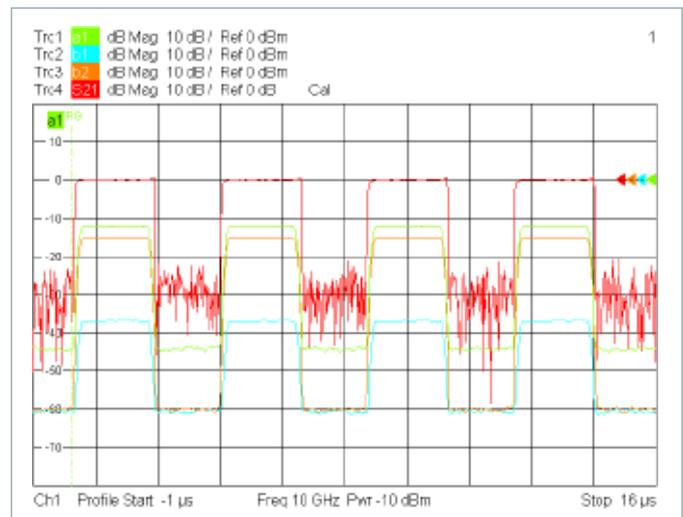


图9 ZVA脉冲时域参数测试的时域包络数据

■ 频谱分析

与频谱仪相比，网络分析仪在测量功率时最大的问题在于它不能完全去除镜像噪声的影响。原因是频谱仪在混频之前加入了预选滤波器，可以抑制镜像噪声的影响。R&S的网络分析仪可以选择不同的本振频率，可以分别使用高本振 $RF > LO$ 或低本振 $RF < LO$ 来进行频谱测试。如下图为网络分析仪中实际产生的频谱分量，包括了输入信号的频谱和产生的镜像分量。

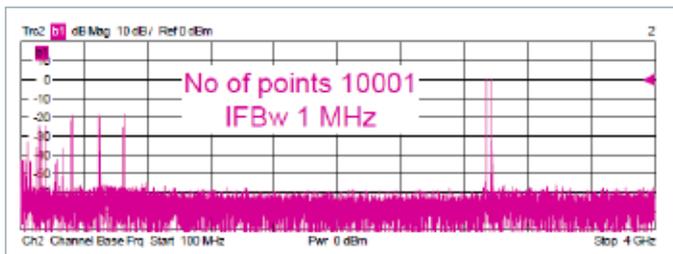


图10 包含镜像分量的频谱图

当选择不同的LO频率时所显示的杂散位置会不同。但实际测量的信号位置不会变化。向网络分析仪端口1输入固定频率为3 GHz的单音信号，通过选择不同的LO频率，测量接收机b1测量结果。建立两个不同的通道，并用不同的迹线进行显示Trc1和Trc2。其中Trc1设置为 $RF > LO$ ，而将Trc2设置为 $RF < LO$ 。显然下图中的频率除3GHz的频谱成分外，其它都是杂散信号。

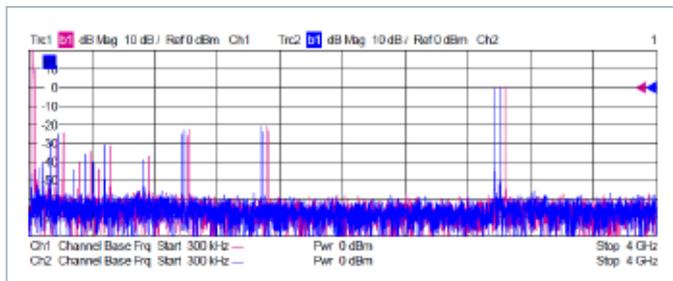


图11 分别在高本振和低本振模式下，进行两次扫描的频谱数据

利用网络分析仪中的数学运算功能，取两条迹线中的最小值 Min (Trc1, Trc2)，便可将镜像部分去掉，保留被测信号的频谱，如图12所示。

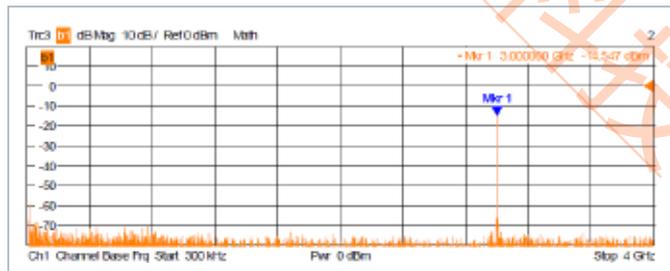


图12 ZVA的频谱分析结果

为保证测试绝对功率的精度，需在测前进行接收机的功率校准。

以下图13为ZVA的IFBW为100 kHz时，扫描4 GHz频率范围时扫描时间和小信号测量结果。

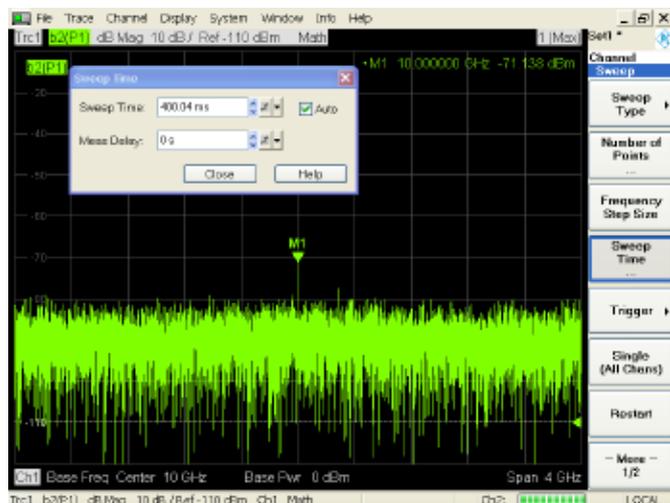


图13 ZVA对小信号的频谱分析结果和测试时间

测试射频箱OSP-TRM



图14 OSP-TRM外形图

OSP-TRM是为TRM测试定做的射频箱，包括脉冲调制器、合路器、低噪放和射频开关等模块，完成测试链路切换、通道功率控制和并行测量等功能。OSP-TRM原理框图见下图所示。

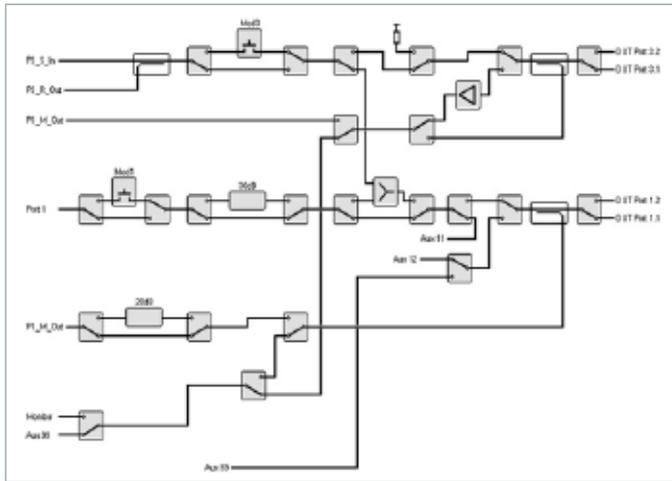


图15 OSP-TRM结构图

OSP-TRM射频箱主要功能：

- 链路功率电平控制模块
- 收发转换控制模块
- 信号合成模块
- 脉冲调制模块
- 监视通道，频谱仪、功率计等其它仪表接入控制模块

控制终端TSVP



图16 TSVP外形图

TSVP是基于PCI总线技术，可集成多功能测试板卡的机箱。具体功能如下：

- 工控机，Windows XP系统
- 高速数字模块 (40 MHz码速率)
- 可编程控制电平
- 衰减/移相高速设置
- DUT控制时序缓存
- 实时评估DUT响应
- 系统触发信号及时序控制
- 提供多通道电源±50V/50 W，电流测量功能
- 系统自检
- 数字万用表
- 射频链路控制信号产生

测控软件R&S®RUN

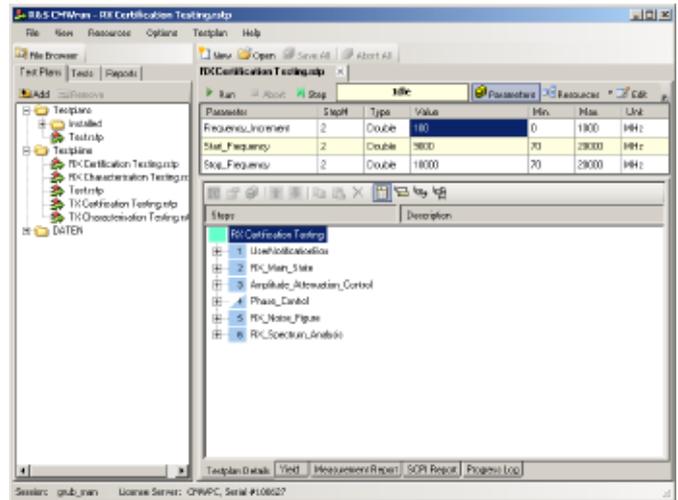


图17 测控软件R&S®RUN

R&S®RUN提供用户可配置的测试时序、自动规划校准向导和测试报告等，具体功能如下：

- 测试界面及参数设置菜单
- 仪表驱动控制
- 数据获取
- 测试报告生成
- 测试时序控制
- 其它功能

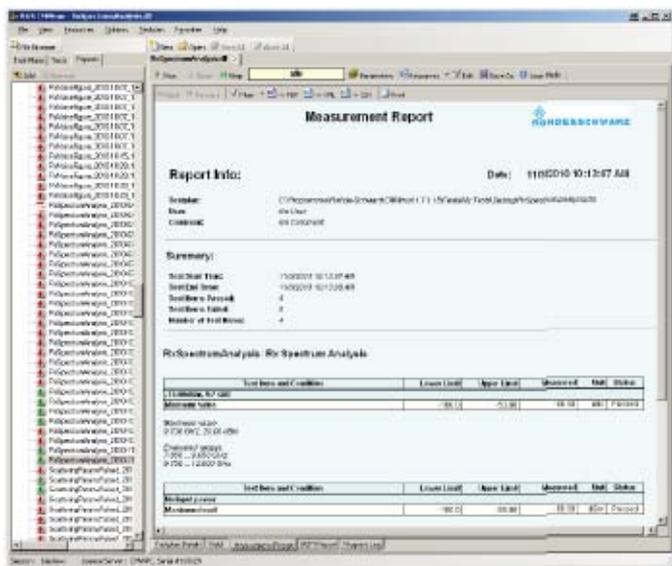


图18 在线生成测试报告

测试系统的时序控制

为保证系统高效、精确地完成指定的测试任务，在满足自动化测量的基础上，合理安排系统的工作时序是首要条件。通过综合考虑DUT接收支路和发射支路的转换时间、控制指令传输/响应时间、测试仪表设置和测量时间、DUT的响应时间以及脉冲状态下仪表的触发时序等关键时间点来安排与测试任务匹配的工作时序。下图19是典型的TRM自动测试的工作时序图。

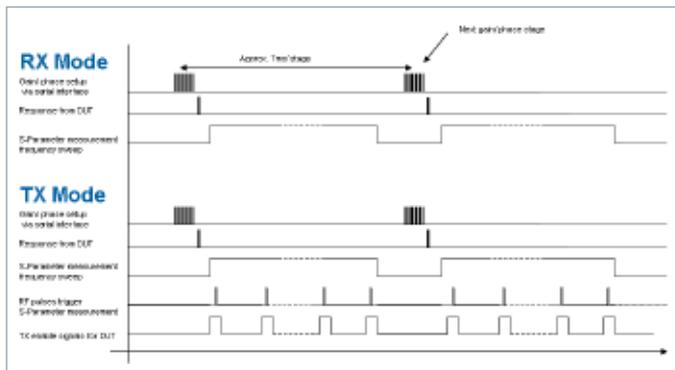


图19 典型TRM测试的时序图

如前所述，系统TS6710将TRM测试分为两个层次：验证测试和特性测试。前者应用于产线，仅测试的主要或典型参数，并生成测试报告，典型结构的TRM需要约2500个测试值，测试时间为15秒左右；后者应用于研发阶段，全状态测试，约25000个测试值，测试时间为4分钟左右。

接收支路验证测试

| 测试项目 | 测试条件 |
|--|--|
| 增益测试（衰减状态） 增益测试（移相状态） 天线端回波损耗 输出端回波损耗 | 校准：全双端口 扫频范围：1 GHz，21点 测量状态：8个相位，8个衰减状态 测量项目：S22, S12, S11 测试时间：100.8 ms |
| 衰减控制 相位控制 | 校准：单向双端口 扫频范围：1 GHz，21点 测量状态：7个相位，7个衰减状态 测量项目：S12 测试时间：58.1 ms |
| 噪声系数 | 扫频范围：1 GHz，21点 测量状态：2个衰减状态 测量项目：NF S12 测试时间：<4秒 |
| 接收频谱分析 电压，电流测试 | 扫描范围：7.0-20 GHz，10001点 测量状态：无射频激励，有射频激励 测试时间：<800 ms |

发射支路验证测试

| 测试项目 | 测试条件 |
|----------------------------|--|
| 输出功率 天线端回波损耗 输入端回波损耗 | 校准：全双端口 扫频范围：1 GHz，21点 测量状态：8个相位，8个衰减状态 测量项目：S11, S21, S22 测量时间：100.8 ms |
| 输入功率扫描 | 校准：单向双端口 功率范围：16点功率扫描@80kHz PRF 扫频范围：1 GHz，21点 测量项目：S21 测试时间：66.4 ms |
| 发射频谱分析 电压，电流值测试 | 扫描范围：7.0-20 GHz，10001点 测量状态：无射频激励，有射频激励 测试时间：100.8 ms |

接收支路特性测试

| 测试项目 | 测试条件 |
|--|--|
| 接收增益 动态控制范围 衰减量误差RMS 移相量误差RMS | 校准：全双端口 扫频范围：1 GHz, 21点 测量状态：256个相位, 256个衰减状态 测量项目：S22, S12, S11 测量时间：25.80秒 |
| TOI | 校准：功率校准 功率步进：1 dB步进, 6次 扫频范围：1 GHz, 21点 测量状态：2个衰减状态 测量项目：IP3和TOI 测量时间：<5秒 |
| 噪声系数 | 扫频范围：1 GHz, 21点 测量状态：2个衰减状态 测量项目：NF S12 测量时间：<4秒 |

发射支路特性测试

| 测试项目 | 测试条件 |
|------------------------|---|
| 线性功率下衰减测试 线性功率下移相测试 | 校准：全双端口 扫频范围：1 GHz, 21点@80 kHz PRF 测量状态：256个相位, 256个衰减状态 测量项目：S11, S21, S22 测量时间：27.24秒 |
| 饱和功率下衰减测试 饱和功率下移相测试 | 校准：全双端口 扫频范围：1 GHz, 21点@80 kHz PRF 测量状态：256个相位, 256个衰减状态 测量项目：S11, S21, S22 测量时间：27.24秒 |

系统扩展

标准的测试系统TS6710提供了2个TRM的并行测量功能。可根据测试需求增加系统端口的数量，达到8个TRM并行测量的能力。

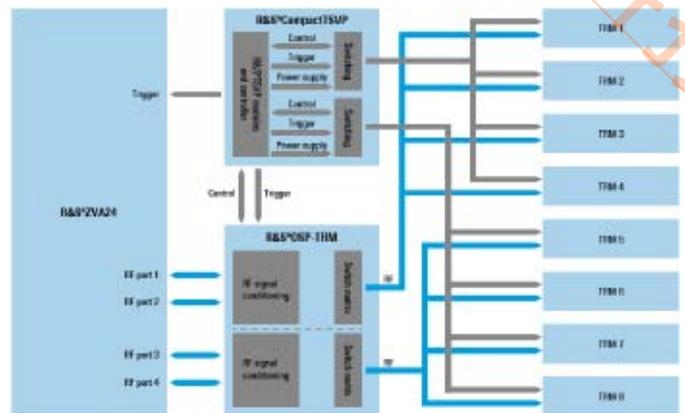


图19 系统扩展框图

主要系统指标

TRM测试系统TS6710主要系统指标：

| 项目 | 备注 | 特性 |
|----------|---|--|
| 频率范围 | | 1 GHz – 24 GHz |
| 最大输入功率 | TR组件输出 | 50 W (5 μs脉宽, 2.5 % 占空比) |
| 最大输出功率 | | -2 dBm |
| 杂散测量动态范围 | | -60 dBc |
| 时间分辨率 | 脉冲时域波形测量 | 30 ns |
| 典型测试时间 | 全状态测试 (12幅相个控制位, 约25000次测量) 主要参数测试 (2500次测量, 产线应用) | <4 min <15 s |
| 波控 | | <ul style="list-style-type: none"> ■ 40 MHz时钟速率 ■ 可编程控制电平参数 ■ 板载数控指令存储 ■ 实时TRM状态监测 |
| TRM直流供电 | 多供电通道, 电流监测 | 50V/50 W |

七 全球卫星导航设备测试平台

本测试解决平台，包括卫星导航定位系统的基本原理、四大卫星导航定位系统和卫星导航增强系统介绍以及如何使用SMBV100A进行接收机测试，测试项目包括TTFF、灵敏度、定位精度、移动接收和干扰测试等。

全球卫星导航系统GNSS概述

GNSS是Global Navigation Satellite System的缩写，即全球卫星导航系统，它是利用卫星来测量物体位置、速度及授时等功能的系统。中国BeiDou、美国GPS、俄罗斯Glonass和欧盟Galileo为联合国卫星导航委员会认定的全球卫星导航系统四大核心供应商。

卫星导航技术已经成为我们生活中不可或缺的一部分，应用领域涵盖个人消费者、工业、汽车和军工等。导航的重要性一直在提升，潜力巨大。有一个非常明显的趋势是在个人消费市场，导航接收机使用越来越广泛，其中汽车和移动终端的导航和定位应用尤其重要。

卫星导航定位系统组成

卫星导航定位系统主要由空间部分、地面控制部分和用户设备部分组成，如下图所示：

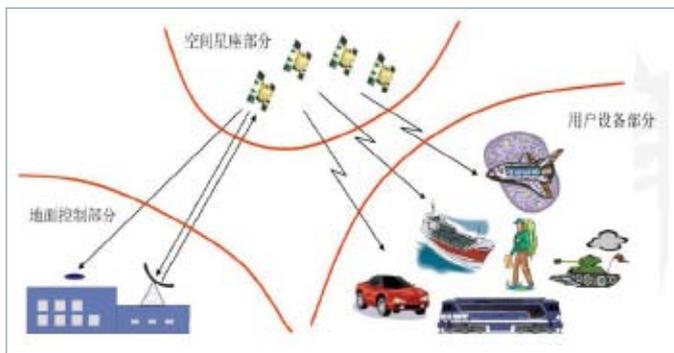


图1 GNSS卫星导航系统组成

其中：

- 空间部分：包括GNSS工作卫星和备份卫星；
- 地面控制部分：控制整个系统和时间，负责轨道监测和预报；
- 用户设备部分：主要是各种型号的接收机。

卫星导航定位系统频段划分

各种不同的卫星导航定位系统的频段有所不同，具体可参见下图所示：

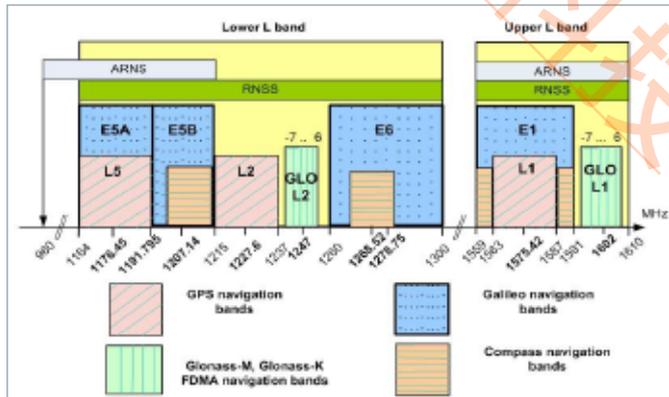


图2 GNSS卫星导航系统频段划分

卫星导航定位原理

GNSS的定位原理，简单来说，就是利用几何与物理的一些基本原理，利用空间分布的卫星以及卫星与地面点间距离交汇出地面点位置的方法。因此，若假定卫星的位置已知，通过一定的方法我们又准确测定出地面点A至卫星间的距离，那么A点一定位于以卫星为中心，以所测得距离为半径的球上。若我们能同时测得点A至另两颗卫星的距离，则该点一定处在三个球相交的两个点上。根据地理知识，我们很容易确定其中一个点是我们所需要的点。

以上假设，需要知道已知卫星的位置同时还得测定接收机到三颗卫星的距离，即可实现定位，但是由于卫星大多是分布在两万公里高空的运动载体，只能是在同一时间测定三个距离才可定位，要实现同步必须具有统一的时间基准，从解析几何角度出发，GNSS定位需要包括确定一个点的三维坐标与实现同步的四个未知参数，因此，必须通过测定到至少4颗卫星才能定位，如下图的方程所示：

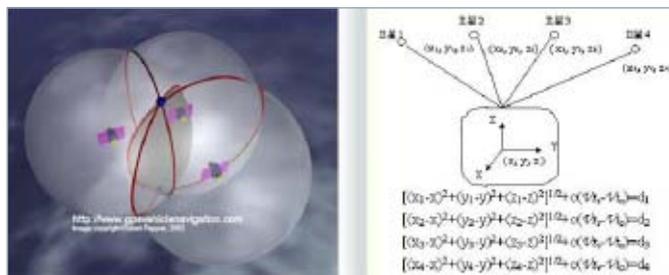


图3 卫星定位原理及方程表达式

确定卫星三维坐标

卫星导航定位是以卫星为已知的基准点，通过测量站星间的距离，解算用户的位置。而卫星的在轨参数信息主要包含在卫星的导航电文中。

GPS卫星导航电文是用户利用GPS定位和导航所必须的基础数据。它主要提供了卫星在空间的位置、卫星的工作状态、卫星钟的修正参数、电离层延迟修正参数等重要信息。这些信息是以二进制码的形式按规定格式编码，并按帧发给用户接收机，因此又称之为数据码(D码)。

确定站星间的距离

距离测量主要采用两种方法：一是测量GNSS卫星发射的测距码信号到达用户接收机的传播时间，即伪距测量；二是测量具有载波多普勒频移的GNSS卫星载波信号与接收机产生的参考载波信号之间的相位差，即载波相位测量。通过4颗或4颗以上的卫星同时进行伪距或载波相位测量即可推算出接收机的三维位置。

全球卫星导航系统GNSS介绍

GPS

GPS (Global Positioning System) 即全球定位系统，属于美国建设、维护的卫星导航系统，也是目前应用最为广泛的卫星导航系统。它是一个被动式定位的卫星导航定位系统，由美国陆海空三军于20世纪70年代联合研制。

GPS由21颗工作卫星和3颗在轨备用卫星组成卫星星座，24颗卫星均匀分布在6个轨道平面内，轨道倾角为55度，卫星距离地球表面的平均高度为20000公里，运行速度为3800 m/s，运行周期为11时58分。如图1所示，每颗卫星可覆盖全球约38%的面积，卫星的分布可以保证在地球上任何地点、任何时刻，同时能观测到4颗卫星。

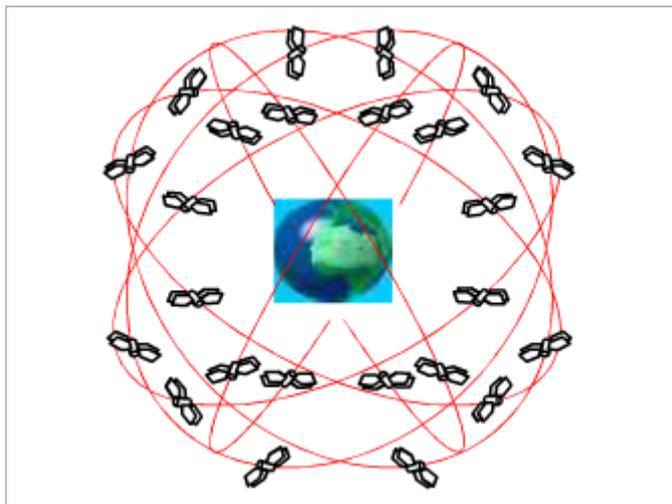


图4 GPS卫星星座

GPS卫星发射两种频率的载波信号，即频率为1575.42 MHz的L1载波和频率为1227.60 MHz的L2载波，在L1和L2上又分别调制着多种信号，这些信号主要有：C/A码(粗捕获码)、P码(精码)和导航信息。GPS采用了信号扩频调制，把窄带信号扩展到一个很宽的频带上发射出去，已达到抗干扰、保密和省电的目的。

GLONASS

前苏联从80年代初开始建设的与美国GPS系统相类似的卫星定位系统，也是由卫星星座、地面监测控制站和用户设备三部分组成。Glonass系统的卫星星座由24颗卫星组成，均匀分布在3个近圆形轨道平面上，每个轨道面8颗卫星，轨道高度19100公里，运行周期11小时15分，轨道倾角64.8度。与美国GPS系统不同的是Glonass系统采用频分多址方式，根据载波频率来区分卫星(GPS是码分多址，根据调制码来区分卫星)。每颗Glonass卫星发射的两种载波频率分别为： $L1 = 1602 + 0.5625 * k$ (MHz) 和 $L2 = 1246 + 0.4375 * k$ (MHz) 其中， $k = 1 \sim 24$ ，为每颗卫星的频率编号。



图5 GLONASS卫星星座

GALILEO

Galileo系统原理同GPS相似，可以覆盖全球的导航和定位功能，为用户提供误差不超过1米的高精度、高可靠性的定位服务。

Galileo系统的基本结构包括星座与地面设施、服务中心、用户接收机等，卫星星座由30颗卫星组成（27颗工作卫星和3颗备用卫星），卫星采用中等地球轨道，均匀分布在高度约为23616 Km的3个中高度圆轨道面上，倾角为56度。卫星的设计寿命为20年，卫星信号采用4种位于L波段的多载频来发射，其频率分别为：E5a: 1176.45 MHz、E5b: 1207.14 MHz、Eb: 1278.75 MHz、E1:1575.42 MHz Galileo系统的主要特点是向用户提供公开服务、安全服务、商业服务、政府服务等不同模式的多服务，它除了具有全球导航定位功能外，还具有全球搜寻救援功能。

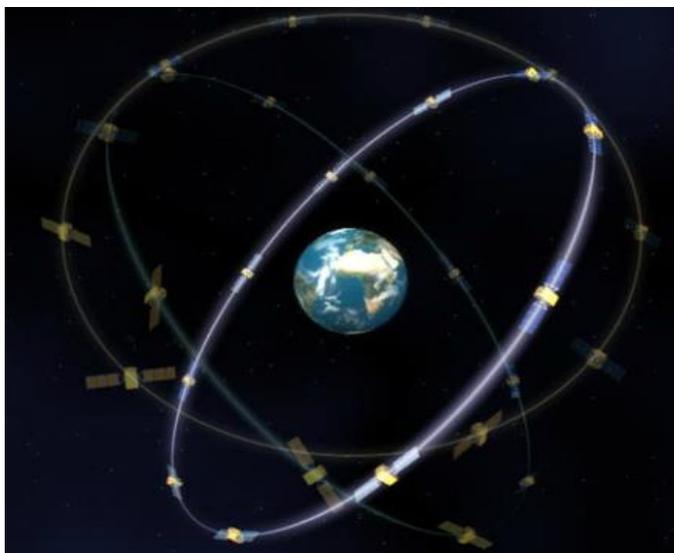


图6 GALILEO卫星星座

BeiDou

BeiDou即北斗卫星导航系统，是中国自行研制的全球卫星定位与通信系统，是继GPS、Glonass之后第三个成熟的卫星导航系统。系统由空间端、地面端和用户端组成，可在全球范围内全天候、全天时为各类用户提供高精度、高可靠定位、导航、授时服务，并且具有短报文通信能力。

北斗系统的空间端由5颗静止轨道卫星和30颗非静止轨道卫星组成，地面端包括主控站、注入站和监测站等若干地面站。用户端由北斗用户端以及与其他卫星导航系统兼容的终端组成。

北斗卫星信号使用如下三个频段：

■ B1:1559.052~1591.788 MHz

■ B2:1166.22~1217.37 MHz

■ B3:1250.618~1286.423 MHz

现阶段北斗卫星信号（第二阶段）的基本特征如下表所示：

| 序号 | 中心频率 (MHz) | 码速率 (cps) | 带宽 (MHz) | 调制方式 | 服务类型 |
|---------|------------|-----------|----------|------|------|
| ■ B1(I) | 1561.098 | 2.046 | 4.092 | QPSK | 开链 |
| ■ B1(Q) | | 2.046 | | | 授链 |
| ■ B2(I) | 1207.14 | 2.046 | 24 | QPSK | 开链 |
| ■ B2(Q) | | 10.23 | | | 授链 |
| ■ B3 | 1268.52 | 10.23 | 24 | QPSK | 授链 |

作为全球系统，北斗卫星导航系统在2012年左右已经覆盖亚太地区，将在2020年之前完成全球覆盖，其卫星星座如下图所示：

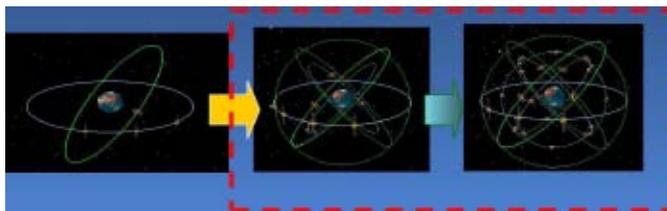


图7 BeiDou卫星工作星座

GBAS

GBAS - Ground-Based Augmentation Systems, 地基增强系统空中交通管理系统从现有陆基导航系统向星基导航系统过渡已成为未来发展的必然趋势。卫星导航系统可以提供全球、全天候、连续实时的导航, 具备成为支持民用航空的主用导航系统的能力。为保证飞行安全, 民航精密进近和着陆引导在精度、完好性和可用性等方面都对卫星导航提出了很高的要求。为此, 国际民航组织提出了地基增强系统 (GBAS)的概念, 美国定义其名称为本地局域增强系统 (LAAS)。

GBAS通过差分定位提高卫星导航精度的基础上, 增加一系列完好性监视算法, 提高系统完好性、可用性、连续性指标, 使机场覆盖空域范围内的配置相应机载设备的飞机获得到达I类精密进近 (CAT-I) 甚至更高标准的精密进近、着陆引导服务。

GBAS由地面站、监控设备和机载设备组成。GBAS地面站包括四对参考接收机和天线、地面数据处理设备、甚高频数据广播 (VDB) 设备和VDB天线等。地面数据处理设备通过结合来自每个参考接收机的测量值产生可见卫星的差分校正值; 同时, 通过实时监测导航信号本身或者是地面站的异常, 形成卫星导航系统和本站自身的完好性信息; 然后把FAS数据、校正值和完好性信息通过VDB广播给机载用户。机载设备为多模式接收机 (MMR)。由于机载用户和GBAS站的距离很近 (小于50公里), 它们之间的误差有很强的相关性, 所以通过这种方法能够提高机载用户的定位精度和完好性。

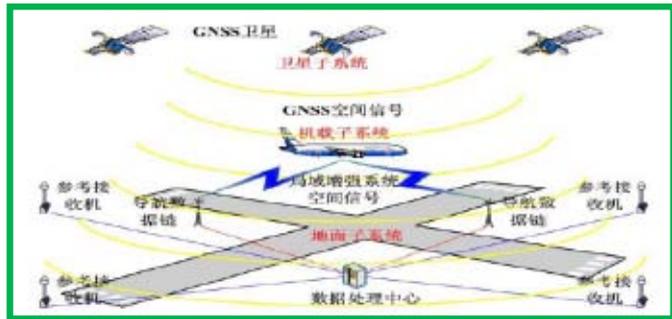


图8 GBAS系统组成

SBAS

SBAS - Satellite-Based Augmentation Systems, 星基增强系统。通过地球静止轨道 (GEO) 卫星搭载卫星导航增强信号转发器, 可以向用户播发星历误差、卫星钟差、电离层延迟等多种修正信息, 实现对于原有卫星导航系统定位精度的改进, 从而成为各航天大国竞相发展的手段。目前, 全球已经建立起了多个SBAS系统, 如美国的WAAS (Wide Area Augmentation System)、俄罗斯的SDCM (System for Differential Corrections and Monitoring)、欧洲的EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service)、日本的MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System) 以及印度的GAGAN(GPS Aided Geo Augmented Navigation)。

上述SBAS系统的工作原理大致相同。首先, 由大量分布极广的差分站 (位置已知) 对导航卫星进行监测, 获得原始定位数据 (伪距、卫星播发的相位等) 并送至中央处理设施 (主控站), 后者通过计算得到各卫星的各种定位修正信息, 通过上行注入站发给GEO卫星, 最后将修正信息播发给广大用户, 从而达到提高定位精度的目的。

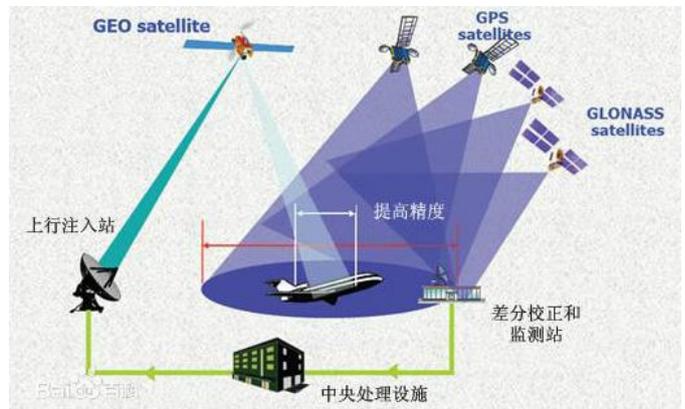


图9 SBAS系统组成

卫星导航模拟器

实时卫星导航模拟的必要性

测试导航接收机的一种方案是使用外部真实的卫星信号。这种方法虽然可以使接收机在包含多种因素影响的真实环境下进行测试，但也存在很大的缺陷，如测试环境变化剧烈且不可预知，这使得无法在保证严格一致的测试条件下执行重复测试。实际上由于需要在不同时间、地点进行验证，这使得真实卫星信号测试变得更加棘手，不仅消耗很多时间和金钱，而且有些测试项根本无法完成，像高海拔和高速度(如飞机)测试就变得不切实际。

导航信号模拟器克服了以上这些问题。仪表能够根据产生模拟的卫星导航信号，也可加入真实环境下接收的各种影响因素。模拟器拥有以下优势：

- 产生的信号严格已知，接收机能够在可控的确定条件下测试；
- 测试条件能够精确重现，这样就能在相同条件下进行多次重复测试；
- 多种条件综合测试，实验室就能模拟任意位置和时间，任意路线下移动接收；
- 可以节省大量的时间和费用，像接收机其中一个关键特性首次定位精度，模拟器可以在极短时间内就能模拟慕尼黑、纽约、北京或悉尼等任何城市，而这是使用真实卫星导航信号根本无法完成的任务；
- 测试条件的构建灵活性大，从模拟单颗静态卫星，到模拟带多径和大气层效应的多颗卫星。因此，可以只在某个特定因素影响下进行测试(屏蔽其他影响)。让用户更加深入了解接收机的性能；

相比于真实的导航信号，导航模拟器产生的信号几乎没有任何噪声，因此能为测试提供极佳的信噪比。一些导航模拟器(如SMBV)，用户可以自定义设置噪声分布。

基于以上原因，导航卫星模拟器是研发和生产中测试接收机功能和性能的理想选择

Rohde-Schwarz卫星导航模拟器SMBV100A

SMBV是一台高性价比的通用矢量信号发生器，具备优异的射频指标，支持几乎所有的通信和广播标准。通过配置一个或多个可选件，SMBV是一台支持GPS、Glonass、Galileo和BeiDou的全能导航模拟器。



图10 R&S®SMBV100A

SMBV为接收机测试提供了强大和可靠的单表解决方案，它提供了以下关键特性：

- 实时导航卫星模拟，支持GPS L1/L2 (C/A和P码)，Glonass L1/L2，Galileo E1和BeiDou B1/B2；
- 最多可支持至24颗卫星；
- 不限的模拟时间，带有卫星空中自动切换功能；
- 静态卫星模拟可配置多普勒频移；
- 模拟产生混合场景的GPS，Glonass，Galileo和BeiDou卫星；
- 静态接收机测试支持自定义或预定义的地理位置；
- 移动接收机测试支持自定义或预定义的行驶路线(可直接导入NMEA数据)；
- 对单颗卫星或全部卫星进行实时动态功率控制，模拟卫星可视性变化(遮挡)。在不影响信号产生情况下激活或去激活卫星；
- 模拟多径传播(可配置延时、功率、多普勒频移和载波相位)；
- 支持电离层和对流层模型；
- 通过导入Almanac文件，支持最新或早期的卫星轨道；
- 通过导入RINEX文件，支持最新或早期的星历数据(多达12个星历集)；
- 可设置的仰角模板，自己移除低仰角的卫星；
- 支持自定义或预定义的A-GPS场景；
- 单表解决方案—无需外部软件或外部电脑；

除了导航卫星模拟外，SMBV还支持数字通信标准如GSM/EDGE，3GPP/HSPA，LTE，WLAN，Wimax，Bluetooth，以及广播标准如FM stereo(带RDS)，HD Radio，Sirius和XM Satellite Radio和DAB。今天的移动终端除了GPS/Glonass/BeiDou外还具备以上所述的一种或多种标准，因此

拥有一台能够支持所有测试信号产生的单表给用户带来很大帮助。所有信号都是实时产生，无需任何外部软件。

SMBV还能选配高斯白噪声产生模块，用于在射频输出信号上叠加可控的噪声，而且还支持叠加CW阻塞干扰。

仪表所有设置都能通过SCPI命令远程控制。因此SMBV可以完成生产或者研发自动化测试，远程控制硬件接口包括以太网 (TCP/IP), GPIB (IEC/IEEE) 和USB。

R&S卫星导航接收机测试方案

对于导航接收机测试，一般有两种方法：辐射测试和传导测试，两者连接的示意图如下：



图11 导航接收机天线口辐射测试

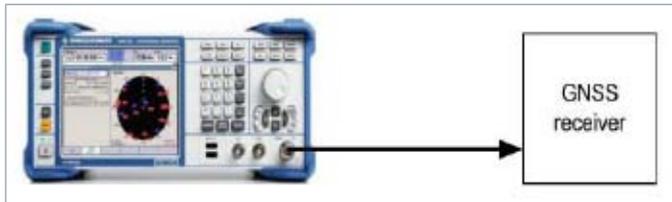


图12 导航接收机传导测试

如果被测导航接收机缺少外部接口时，唯一的办法就是通过空口辐射进行测试，

不过这种方法会存在严重的干扰问题，一方面辐射发射的卫星信号会对真实的卫星导航信号产生干扰，另一方面真实的卫星信号也会干扰测试信号，影响测试精度。为了屏蔽干扰，建议使用合适的屏蔽箱进行测试。如果被测导航接收机可以提供外部接口，推荐使用传导方式进行测试，可以得到更为精准的结果。

导航接收机常见的测试项目如下：

- 标准接收机测试项目：
- 首次定位时间TTFF；
- 定位精度（静态和动态）；
- 灵敏度；
- 重新捕获时间；
- 长久测试

- 特殊条件下的测试：
- 干扰条件下的测试；
- 多径条件下的测试；
- 大气层影响；
- 动态衰落场景；
- 特殊事件测试：
- 闰秒事件；
- 接收机秒脉冲性能验证；
- 生产灵敏度测试；
- 接收机自动化测试；
- 航空航天和国防应用；
- GPS P码测试；
- 载体姿态模拟测试；

标准接收机测试

标准接收机测试是指的常见的接收机测试项目，是接收机基本性能的重要保证。

首次定位时间TTFF

首次定位时间 (Time to first fix, TTFF) 指的是接收机首次搜星获得定位的时间，该指标非常重要，直接影响接收机用户的使用感受。测试过程中SMBV模拟固定位置的卫星星座图，用户可以把SMBV设置成“Auto Localization”模式，该模式下SMBV自动设置卫星参数，用户可以选择预定义的城市或者自定义坐标，模拟的卫星总数最多可达到24颗。对于该项测试，参考电平通常设置为高于捕获灵敏度电平。SMBV主要设置界面如下：

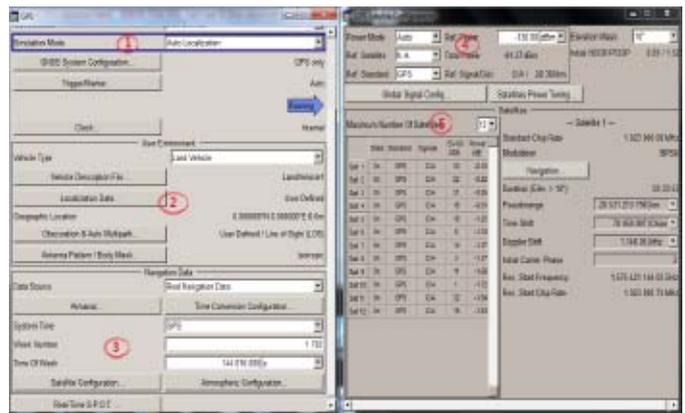


图13 首次定位时间设置框图

灵敏度

灵敏度是指导航接收机获得卫星信号并且得到位置信息所需的卫星发射最小功率，该项测试是为了验证导航接收机捕获或者跟踪卫星信号，并且保持可靠定位状态的能力。捕获和跟踪是接收机最重要的两个参数，虽然在地球表面（晴朗天气）可接收到的卫星信号至少高于-130 dBm，但是在建筑物内或者树下，功率会下降，这时如果具备高接收灵敏度的接收机就可以正常工作。可以通过降低SMBV的发射功率，完成该项测试。

在导航接收机的测试中，灵敏度有两种统计方法：

- 定位精度统计法：即当定位精度小于某一个给定值的时候，计算当前的接收功率，作为接收机的灵敏度；
- CNO统计法：即通过捕获到的卫星载噪比的方式，计算当前的接收电平，作为接收机的灵敏度。其中，灵敏度和CNO直接的关系如下：

$$\text{灵敏度}_{\min} = -174\text{dBm/Hz} + C/N_{\min} + NF_{\text{receiver}}$$

定位精度（静态/动态）

定位精度是指导航接收机定位的位置与真实位置的接近程度，一般需要测试其绝对精度、可重复性和移动状态下的定位精度。

为了测试绝对定位精度，SMBV模拟不同的静态位置，例如参考坐标半径内的任意位置，接收机的上报位置信息和模拟位置进行比较，计算2D和3D误差，最终误差量是不同地点误差的平均值。该测试项参考电平设置为高于捕获灵敏度电平。测试动态定位精度时，SMBV可以模拟接收机沿指定路径移动，SMBV自带一些轨迹文件，也支持用户自定义waypoint文件。接收机上报位置和waypoint文件中的模拟位置进行比较，通过计算经度、纬度和高度差获得2D和3D误差。

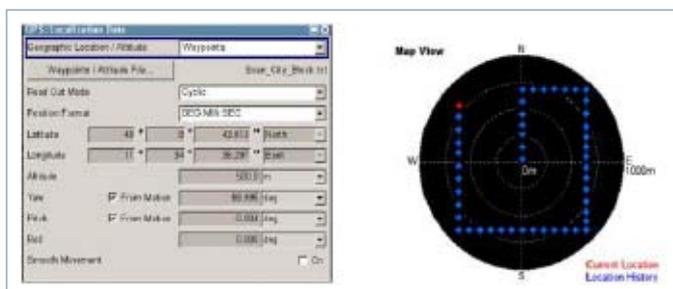


图14 动态场景下的接收机测试

重新捕获时间

重新捕获时间是指接收机在位置信息丢失后，重新获得卫星信号和位置信息所需的时间。该项测试是为了验证接收机在短时间丢失所有信号后能在多短时间内重新捕获卫星信号，重新捕获时间对车载导航接收机来说非常重要。测试过程中SMBV配置为“User Localization”模式，先关闭所有模拟卫星信号，等待一段时间后恢复卫星可视性，参考电平通常设置为高于捕获灵敏度电平。

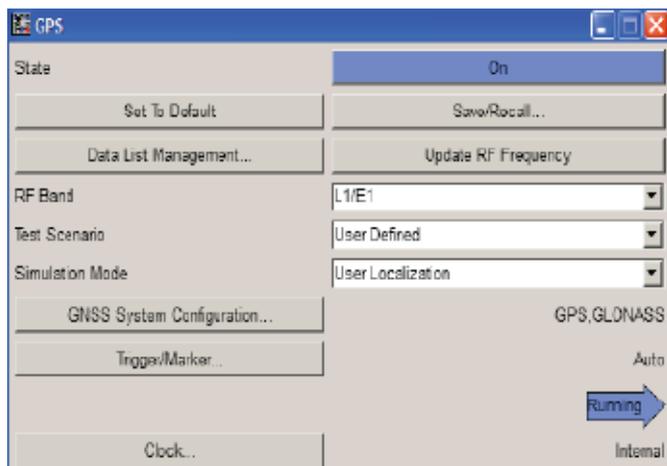


图15 重新捕获时间基本设置

长久测试

长久测试用于验证接收机能否在较长测试时间内提供可靠和精确的位置定位，这样的长久测试需运行至少24小时，也可能是两天或者更长时间。

SMBV模拟空中真实卫星运动，这时会有可见卫星的稳定重建过程，当一些卫星最终消失在地平线以下时，也有一些卫星从地平线升起。SMBV可以模拟卫星的实时切换，因此拥有无限的模拟时间，这样SMBV非常适合于长久测试。同时，SNBV还可以提供长时间稳定的射频信号输出，用于测试。

特殊条件下的测试

标准条件下的测试只能保证接收机的基本性能，但是接收机处于复杂场景下的性能，需要做相关的特殊条件测出，例如：多径、大气层影响、遮挡效应等；

干扰条件下的测试

该项测试是为了验证非期望干扰信号如何影响接收机性能，由于卫星信号功率非常低，致使其很容易受到干扰。当接收机受到干扰信号影响时，性能指标就会下降甚至无法获取或跟踪卫星。移动终端和芯片组集成了越来越多的功能，使得干扰不可避免，导航接收机的性能必须在可能的干扰源

如WLAN、蓝牙、FM立体声和移动通信标准信号下进行测试，保证导航功能的正确性。

干扰测试中需要第二台信号发生器，例如第二台SMBV。一台SMBV产生导航信号，另一台用于产生干扰信号，然后通过合路器合并，如下图：

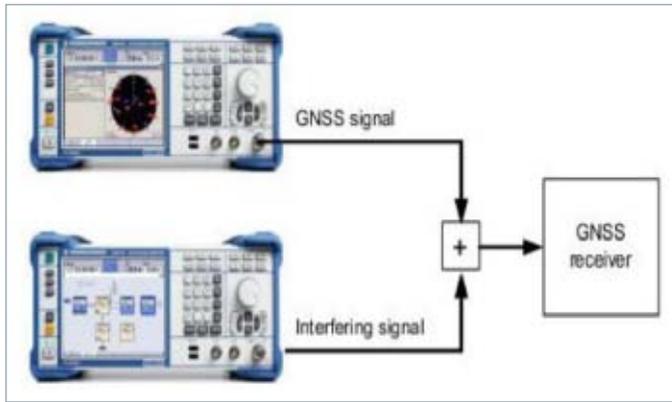


图16 干扰条件下的测试框图

SMBV是一台全功能的信号发生器，支持数字通信标准信号产生，包括GSM/EDGE、3GPP WCDMA、LTE、WLAN、WiMAX和Bluetooth等，广播信号像FM立体声、HD Radio和DAB等，以及各种导航卫星标准。而且内置的ARB发生器可以用来回放用户自定义的干扰信号。干扰信号的输出电平可以有很大的动态范围，并且支持频率扫描和功率扫描功能。

多径条件下的测试

该项测试是为了验证接收机在受到多径影响下的导航接收性能变化，尤其是定位精度、首次定位时间和重新捕获时间的下降程度。

实际环境下尤其是城市，卫星信号会受到建筑物和其他城市物体的反射，因此到达接收机的卫星信号不仅有直射信号，而且包含了每颗卫星多径后的信号，这些卫星信号以不同时间延和衰减到达接收机。为了测试接收机在多径作用下的接收能力，SMBV可以模拟一颗或者多颗卫星的静态多径传播，可以为每颗卫星设定多径传播参数，SMBV最多可以模拟24条路径。设置界面如下图：

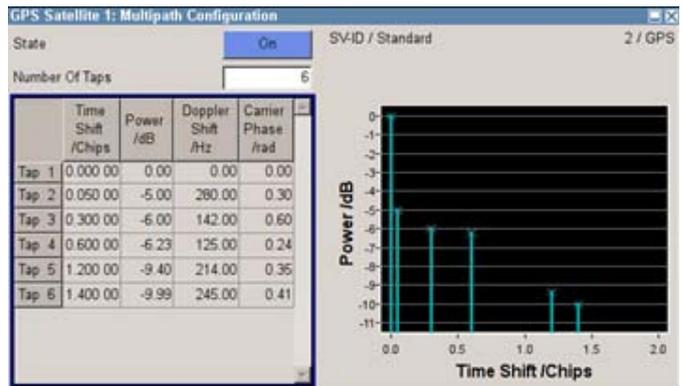


图17 多径条件下的测试

大气层下的测试

该测试项用于验证由于大气层造成的时延对于接收机性能的影响，尤其是定位精度。卫星信号到达接收机的路线中需经过由不同特性组成的地球大气层，其中电离

层和对流层占主要影响。SMBV支持模拟卫星信号在电离层和对流层中的传播特性，对于GPS，Klobuchar模型应用于电离层建模，STANAG模型应用于对流层建模，设置界面如下：

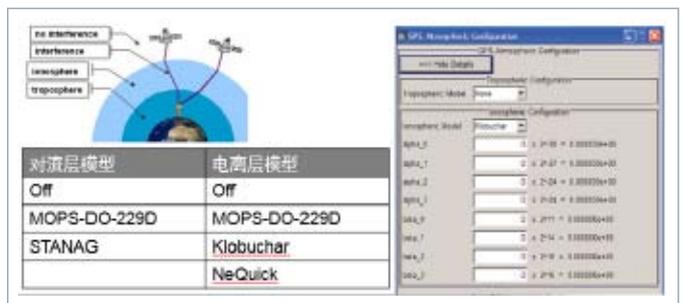


图18 大气层建模条件下的测试

动态衰落场景下的测试

在很多情况下，卫星信号不能直接到达接收天线，相反地，卫星信号会建筑物、树木或地面反射。相对于直达信号，此类多径信号到达天线更迟，具有衰减，会造成显著的定位误差。

该项测试用于验证接收机沿着一个或者三个方向（经度、纬度和高度）运动路径下受到各种障碍物的阻挡或者多径条件下的接收性能，通过测试定位精度和重捕获时间，验证接收机移动时是否能很好地跟踪卫星。

测试中，SMBV不仅能模拟卫星的移动而且还可以模拟接收机的运动，因此就像接收机自己在真的移动一样。如上节所示，SMBV支持移动轨迹文件，如下图：

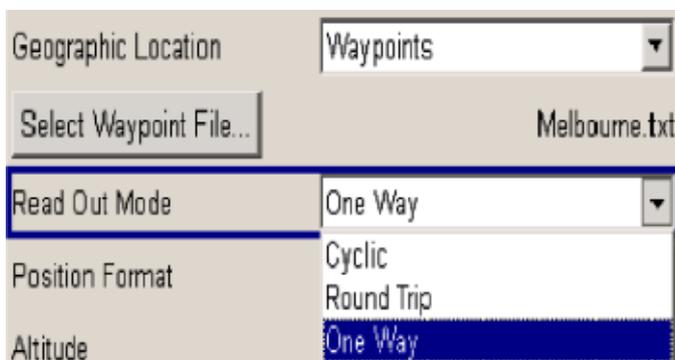


图19 运动轨迹定义

- SMBV支持的路径文件为Waypoint方式，包括：
- KML文件 (Google Earth输出格式)
- Waypoints文件 (R&S定义格式)
- txt文件
- NMEA文件
- xtd文件 (包括：位置、速度、姿态等信息)

为了充分验证接收机针对各种障碍物条件下的性能测试，SMBV100A提供各种场景的模拟，特色如下：

- 用户自定义垂直障碍，建模城市环境
- 用户自定义道路平面，建模高速公路和周边环境
- 用户自定义界面建模飞机和船舶的陆地/海洋反射
- 用户自定义界面将隧道建模为全信号模糊
- 在自动定位模式下根据所建模的用户环境，自动实时更新卫星可见性和多径
- 10 Hz模糊和多径环境采样信号 (码片速率)
- 可配置的垂直障碍、道路平面和陆地/海洋区域的材料特性
- 诸如农村区域、亚城市区域、城市巷道、隧道、桥梁、高速公路之类的环境模型
- 需要R&S®SMBV-K44、R&S®SMBV-K66、R&S®SMBV-K94 或R&S®SMBV-K107选项
- 自动多径更行需要R&S®SMBV-K92

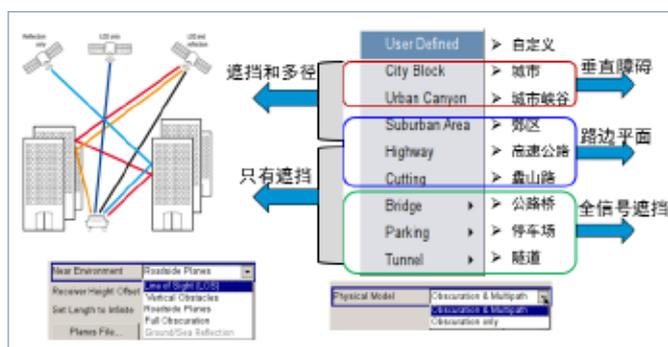


图20 遮挡效应及多径效应的模拟

特殊事件测试

标准条件和特殊条件下的测试保障了接收机的主要性能，不过由于地球自转的影响及接收机本身时钟性能的优劣，都会对接收机的性能再次造成影响，为了评估接收机在处理这类事件的能力，需要做闰秒插入测试及秒脉冲测试。

闰秒插入测试

该项测试用于验证接收机是否能正常处理闰秒插入，考虑到地球转动的变化，世界标准时间(UTC)需要通过闰秒定期修正。通过插入一个闰秒，UTC年就能增加一秒时间。对比而言，GPS时间连续，无法通过闰秒修正。UTC和GPS之间的时间差通过导航信息广播。在2012年，时间差是16秒。接收机使用广播的UTC到GPS时间差提供UTC时间。一旦闰秒插入事件产生，UTC到GPS时间差增加一秒。

SMBV可以非常方便模拟闰秒插入事件，支持验证接收机能否响应插入事件和调整显示的UTC时间。SMBV工作于“User Localization”模式。如果模拟的是过去时刻，SMBV可以自动显示下一次闰秒插入的时间(相对应于当前模拟时间)，也可以用来显示对应的闰秒偏差。但是，用户也可以自定义设置时间和闰秒偏差。SMBV自动修改导航消息用于通知接收机闰秒插入事件的周/日，以及当前和下一个闰秒偏差。模拟的闰秒插入都是在00:00时刻发生。SMBV设置界面如下：

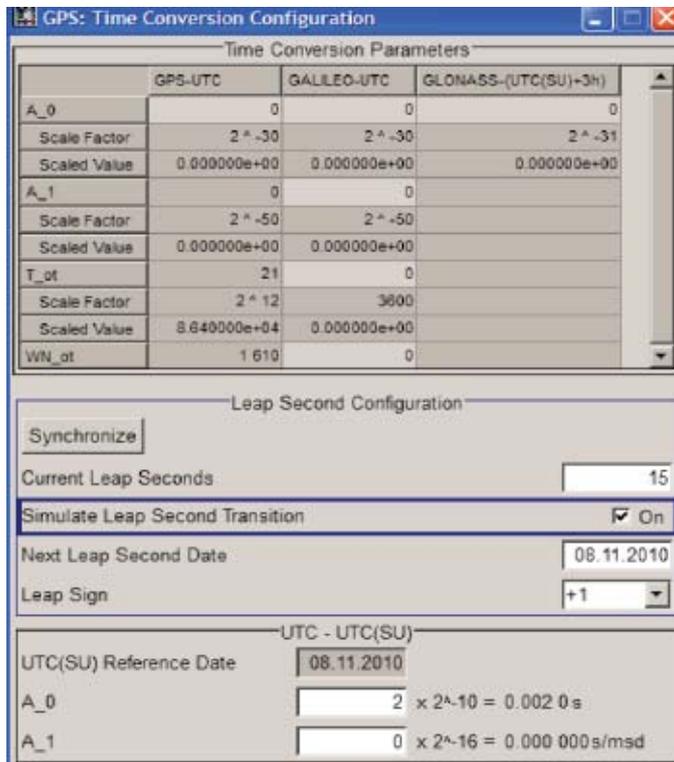


图21 闰秒插入测试

接收机秒脉冲性能测试

用于验证接收机秒脉冲输出精度。很多接收机能输出同步于GPS时钟(如果是GPS接收机)的秒脉冲信号，上升沿和GPS秒对齐。这些秒脉冲信号可以用来同步本地时钟，如CDMA2000网络就使用GPS的秒脉冲信号作为的基站间同步信号。

SMBV在Marker输出端提供一下定时信号：1PPS (1秒产生一次脉冲信号)、1PP2S (2秒产生一次脉冲信号) 和10PPS (100 ms产生一次脉冲信号)，设置界面如下：

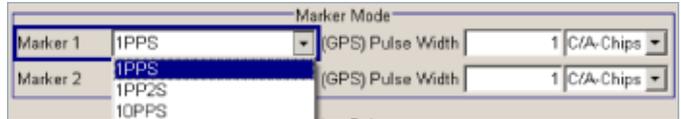


图22 导航模拟器秒脉冲输出设置

通过比较SMBV的1PPS和接收机的1PPS就能得到定时准确度，下面测试框图中SMBV的1PPS作为时间基准，通过示波器比较脉冲沿的时间差就能得到脉冲稳定性和抖动参数。

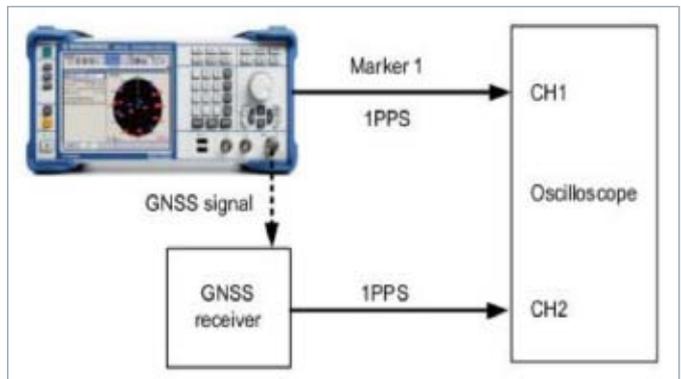


图23 接收机秒脉冲测试框图

生产灵敏度测试

在GNSS模块和接收机的生产测试过程中，需要检查基本的GNSS接收性能。基于R&S SMBV100A的GNSS生产测试仪，在L1/E1频段，模拟GPS、Glonass、Galileo和BeiDou导航标准的卫星。4颗卫星可单独激活，每个具有34dB的动态范围。电平可在飞行中改变，不需要中断信号，这使用户能够同时为每个系统执行独立的灵敏度测试。大动态范围提供了充足的余量，以适应芯片组的差异。

除GNSS信号外，该GNSS生产测试仪还能校准具有明显更高电平的装置而进行的非常基本的测试生成纯净、电平稳定的连续波信号，或者干脆作为干扰源使用。



图24 生产灵敏度测试框图

自动化测试

R&S®SMBV100A也支持自动化测试，可以在操作界面手动控制或远程控制。远程控制需要在上位机通过LAN、GPIB或USB连接SMBV。举例来说，可以有两种方式远程控制SMBV。

- 通过网络远程桌面
 - 自动控制程序，SCPI命令自动配置
- 测试连接图如下：

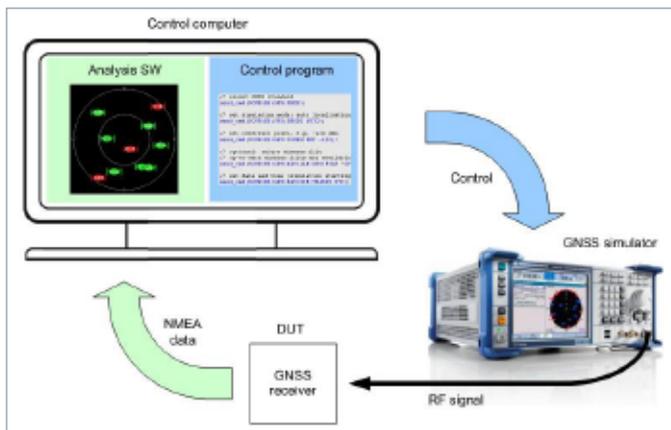


图25 自动化测试框图

接收机通过标准的NMEA数据格式上报结果，这些数据可以通过第三方软件读入并进行处理，完成分析、可视化和数据记录等工作。

航空航天和国防应用测试

前面提到的基本都是民用接收机的测试。针对军用接收机的测试，除了上面提到的基本功能和性能测试外，还需要关注精测距码P码测试及载体姿态模拟等功能。

GPS-P码测试

除了GPS接收机中商用的粗测距码C/A码外，很多应用，特别是美国军事应用，需要精测距码P码。因为更高的码字速率，使用P码信号可以有效提供GNSS接收机的定位精度。

R&S®SMBV100A支持多达12颗卫星，同时生成C/A码和P码信号，信号发生器自动做出不同速率所需的设置，在所有操作模式（静态、动态、用户定位）下的所有接收机测试以及移动场景下的P码测试。

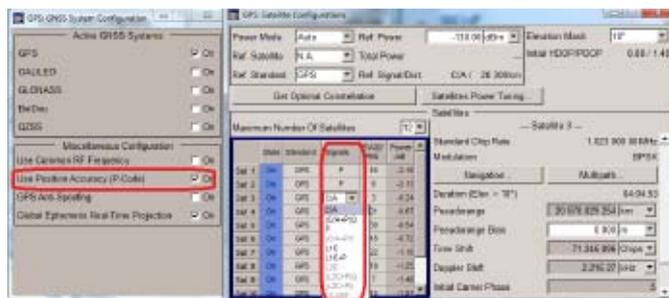


图26 GPS P码测试设置

R&S®SMBV100A甚至支持标准版本下的高信号动态我模拟，可以为移动用户模拟高达599 m/s的速度和160 g的加速度。对于特殊的A&D应用，使用硬件选项可以扩展使用速度范围为10000 m/s。这使得易于模拟诸如超音速和极超音速的飞机运动，其他A&D应用涉及到急转车辆的模拟，也可以在R&S®SMBV100A中实现。

载体姿态模拟测试

对于战斗机、鱼雷、导弹等设备上的接收机，经常都是在旋转的状态，这些载体的姿态会极大地影响导航信号的接收，如下图战斗机和导弹的不同姿态接收到的卫星信号不一样：

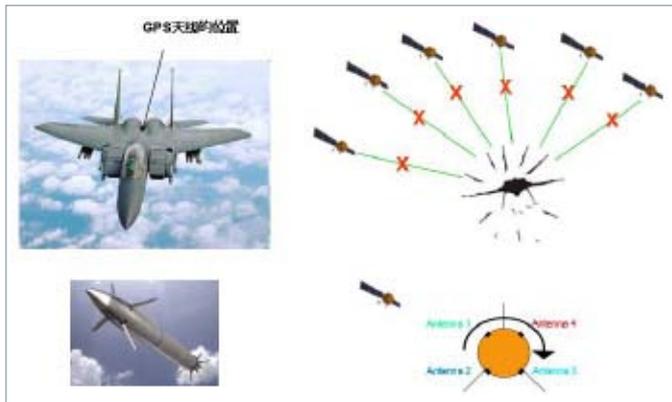


图27 载体姿态对导航信号的影响

针对这种载体姿态的测试，仿真天线的朝向是非常重要的，定义载体姿态数据(旋转、颠簸、摆动)，SMBV即可实时仿真载体姿态变化对接收信号的影响。而对于载体上面有多根天线的情况，则需要考虑多天线的测试，连接框图如下所示：

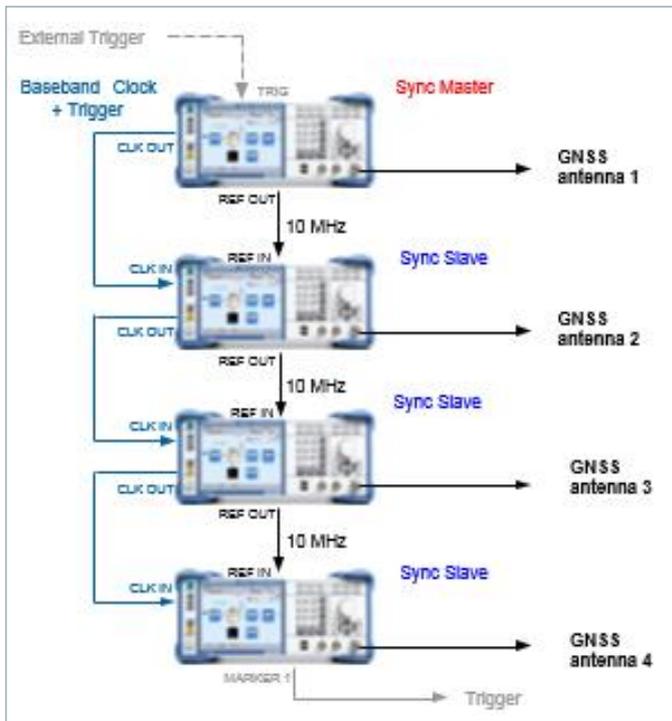


图28 多天线接收机测试框图

总结

R&S®SMBV100A作为导航卫星模拟器，提供了方便、可靠和高性价比的接收机测试解决方案。单表实时产生多达24颗GPS，Glonass，Galileo和BeiDou卫星，这为研发和生产领域的卫星模拟树立了新的标准。

| GNSS标准 | | 信号速率范围 | 标准 | 可选 | |
|-------------------------------------|----------|-----------------------------|---|-----------|-----------|
| GPS | | ✓ | Max. velocity | 599 m/s | 10000 m/s |
| Galileo | | ✓ | Max. acceleration | 1000 m/s² | |
| Glonass | | ✓ | Max. jerk | 400 m/s³ | |
| Compass/BeiDou | | ✓ | Enables a multitude of applications (pedestrian, automotive, aerospace, defense, space) | | |
| QZSS | | ✓ | 支持信号类型 | | |
| SBAS | ✓ | GPS L1 C/A + NAV + (P-Code) | | | ✓ |
| GBAS | ✓ | GPS L2 C/A + NAV + (P-Code) | | | ✓ |
| Simulation of hybrid const. | ✓ | Galileo E1 CBOC | | | ✓ |
| 信号数 / 频率 | | Glonass G1/G2 | | | ✓ |
| No. of channels | 24 | Compass/BeiDou B1/B2 | | | ✓ |
| No. of channels per system | 24 | QZSS L1 C/A + SAIF | | | ✓ |
| No. of supported frequencies | 2 | SBAS L1 | | | ✓ |
| Simultaneous sim. of multiple freq. | 2 instr. | GBAS VHF | | | ✓ |

图29 R&S®SMBV100A卫星导航模拟器特性

配置信息

| | | |
|-----------------------------------|----------------------------|--------------|
| 基本单元 | | |
| R&S®SMBV100A | 矢量信号发生器 | 1407.6004.02 |
| 硬件选项 (GNSS相关配置) | | |
| R&S®SMBV-B103 | 9 kHz 到3.2 GHz | 1407.9603.02 |
| R&S®SMBV-B10 | 基带发生器, 具备实时和ARB功能, 120 M带宽 | 1407.9703.02 |
| R&S®SMBV-B92 | 硬盘 (可拆卸) | 1407.9703.02 |
| R&S®SMBV-B1 | 参考信号振荡器 OCXO | 1407.8407.02 |
| R&S®SMBV-B1H | 参考信号振荡器 OCXO高性能 | 1419.1602.02 |
| R&S®SMBV-B90 | 相位相干 | 1407.9303.02 |
| 软件选项 (仅与GNSS相关) | | |
| R&S®SMBV-K44 | GPS | 1415.8060.02 |
| R&S®SMBV-K65 | 辅助GPS | 1415.8560.02 |
| R&S®SMBV-K66 | Galileo | 1415.8590.02 |
| R&S®SMBV-K67 | A-Galileo | 1419.2509.02 |
| R&S®SMBV-K91 | GNSS扩展到12颗卫星 | 1415.8577.02 |
| R&S®SMBV-K92 | GNSS增强, 例如, 移动、多径等 | 1415.8583.02 |
| R&S®SMBV-K93 | GPS P编码 | 1415.8660.02 |
| R&S®SMBV-K94 | Glionass | 1415.8677.02 |
| R&S®SMBV-K95 | A-Glonass | 1419.2521.02 |
| R&S®SMBV-K96 | GNSS扩展到24颗卫星 | 1415.8790.02 |
| R&S®SMBV-K101 | 用于遮挡效应和自动多径效应模拟 | 1415.8802.02 |
| R&S®SMBV-K102 | 用于天线模式的GNSS扩展 | 1415.8819.02 |
| R&S®SMBV-K103 | 用于旋转和高度的GNSS扩展 | 1415.8825.02 |
| R&S®SMBV-K105 | QZSS | 1419.2350.02 |
| R&S®SMBV-K107 | 北斗 | 1419.2709.02 |
| R&S®SMBV-K110 | SBAS | 1419.2373.02 |
| R&S®SMBV-K111 | GBAS | 1419.2396.02 |
| R&S SMBV100A-P101 GNSS生产测试仪 (独立包) | | |
| 配置 | | |
| R&S®SMBV100A | 矢量信号发生器 | 1407.6004.02 |
| R&S®SMBV-P101 | GNSS生产测试仪 | 1419.2844.02 |

八 材料电磁特性参数测试平台

背景

新材料与信息工程、能源工程及生物工程并列为当今世界上新技术革命的四大支柱。材料的发展在一定程度上反映了一个时代的生产力发展水平，它的品种、产量和质量情况是衡量一个国家科学技术与经济发展水平的一个重要标志。电子材料的发展在整个电子科技领域中总是处于最前沿的，它是电子工业和电子科学技术发展的物质基础，是电子技术进步的原动力。这不仅表现在电子产品的性能直接依赖于电子材料的特性，还表现在新型电子材料的开发能促进许多新型电子元器件的发展。

针对不同外形尺寸、电气参数、物理状态和使用频段的介质材料，需要有对应的测量方法、测量夹具、分析计算方法。本文档描述材料电磁特性参数测量技术方案。涉及液体、固体、粉末、薄膜材料的介电常数/磁导率、反射率（吸收率）测量的技术途径、仪器设备、测量夹具、分析软件等方面。采用的测量方法包括谐振腔法、传输/反射法、空间法、探针法等。

材料电磁特性测量

谐振腔法



图1 谐振腔法测量系统

谐振腔法测量系统可以在一个点频频率上测得复数介电常数和表面电阻。由于谐振腔一般具有极高的品质因数(Q值)，因此测量精度很高。

在测量中，首先利用矢量网络分析仪测量谐振器的谐振频率(f_0)和品质因数(Q_0)；然后加入待测材料，测量此时的谐振器的谐振频率(f_s)和品质因数(Q_s)；通过计算谐振频率的变化(Δf)和品质因数的变化(ΔQ)，可计算待测材料的复数介电常数。

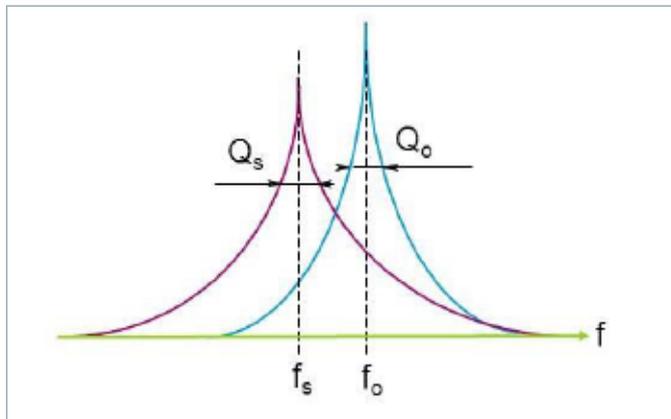


图2 谐振腔法测量原理

根据待测材料的不同，可以采用高Q值谐振腔、微扰谐振腔和分离式介质谐振腔。

高Q值谐振腔

高Q值谐振腔一般采用圆柱形谐振腔，待测材料需加工成圆柱状。



图3 高Q值谐振腔

| | |
|------|---|
| 测量参数 | 介电常数 $\epsilon_r' : >10$; 介电损耗角正切 $\tan \delta : 1 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3}$ |
| 测量精度 | $ \Delta \epsilon_r' / \epsilon_r' \leq 1\%$ $ \Delta \tan \delta \leq 15\% \times \tan \delta + 1 \times 10^{-4}$ |
| 频率范围 | 800 MHz – 18 GHz |
| 样品要求 | 正圆柱体 |

表1 高Q值谐振腔主要技术参数

微扰谐振腔

微扰谐振腔一般采用圆柱形谐振腔或矩形谐振腔，待测材料需加工成直径较小的圆柱体，粉末材料可放置于石英玻璃等圆柱形容容器内。



图4 微扰谐振腔

| | |
|------|--|
| 测量参数 | 介电常数 $\epsilon_r' : 2 \sim 30$; 介电损耗角正切 $\tan \delta : 1 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-2}$ |
| 测量精度 | $ \Delta \epsilon_r' / \epsilon_r' \leq \pm(0.0015 + \Delta h/h)$ $ \Delta \tan \delta \leq \pm \max(2 \times 10^{-5}, 0.03 \tan \delta)$ |
| 频率范围 | 1 GHz – 20 GHz |
| 样品要求 | 圆柱体 |

表2 微扰谐振腔主要技术参数

分离式介质谐振腔

分离式介质谐振腔适用于薄膜材料测量。

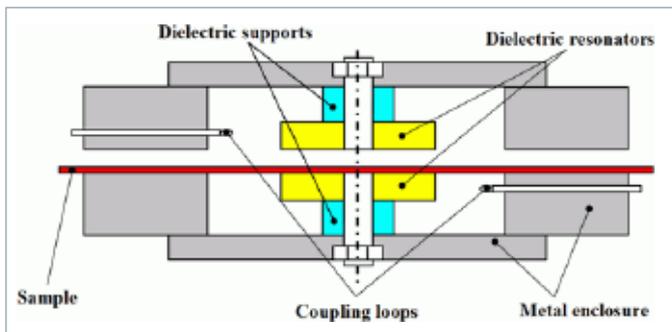


图5 分离式介质谐振腔

| | |
|------|--|
| 测量参数 | 介电常数 ϵ_r' : 2~10 ; 介电损耗角正切 $\tan \delta$: $5 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-2}$ |
| 测量精度 | $ \Delta \epsilon_r' / \epsilon_r' \leq \pm(0.0015 + \Delta h/h)$ $ \Delta \tan \delta \leq \pm \max(2 \times 10^{-5}, 0.03 \tan \delta)$ |
| 频率范围 | 1 GHz – 15 GHz |
| 样品要求 | 薄膜 |

表3 分离式介质谐振腔主要技术参数

传输/反射法

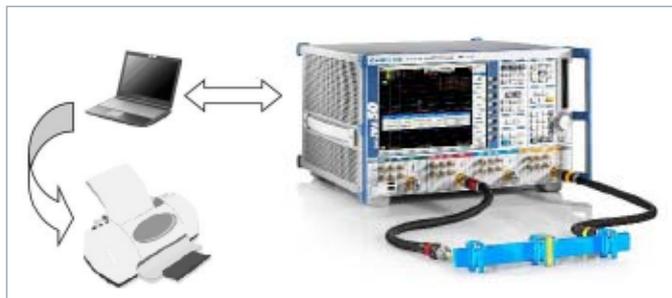


图6 传输/反射法测量系统

传输/反射法是将被测材料填充在传输线内构成一个双端口网络，通过测量散射矩阵，可以计算被测材料的电磁特性参数。传输/反射法可以实现宽带测量。

根据使用的传输线不同，分为波导传输/反射法和同轴传输/反射法。

波导传输/反射法

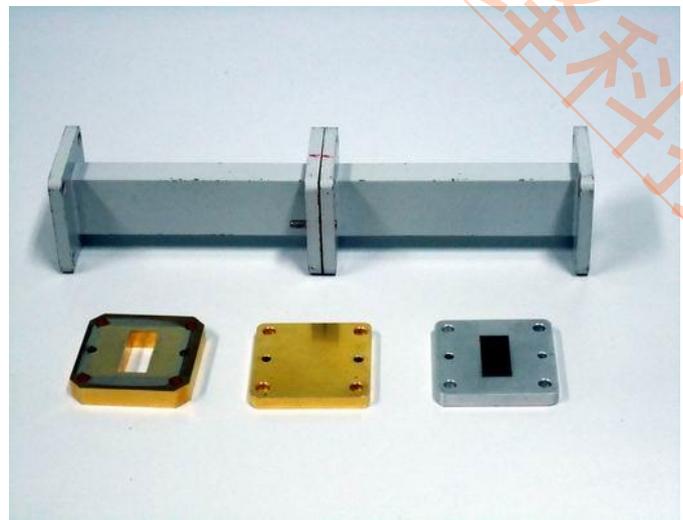


图7 波导传输/反射法测量夹具及校准件

波导传输/反射法主要用于片状材料样品微波电磁参数的测量，测量样品较小，容易制作。测量系统基于波导传输测量法，采用TRL法在波导端面校准，利用矢量网络分析仪测量散射参数，并通过自动测量软件实现参数设置、数据采集与处理、数据显示与存储等功能。

| | |
|--------|--|
| 测量参数范围 | 介电常数 ϵ_r' : 2 – 50 ; 介电损耗角正切 $\tan \delta_\epsilon$: 0.1 – 1 ; 磁导率 μ_r' : 0.3 – 10 ; 磁损耗角正切 $\tan \delta_\mu$: 0.1 – 1.5 ; |
| 测量精度 | $ \Delta \epsilon_r' / \epsilon_r' \leq 10\%$; $ \Delta \tan \delta_\epsilon \leq 10\% \times \tan \delta_\epsilon + 0.05$; $ \Delta \mu_r' / \mu_r' \leq 10\%$; $ \Delta \tan \delta_\mu \leq 10\% \times \tan \delta_\mu + 0.05$; |
| 频率范围 | 2.6 GHz – 40 GHz |
| 样品要求 | 均匀片状材料 |

表4 波导传输/反射法主要技术参数

对于较薄的材料，可以直接夹在波导之间测量：

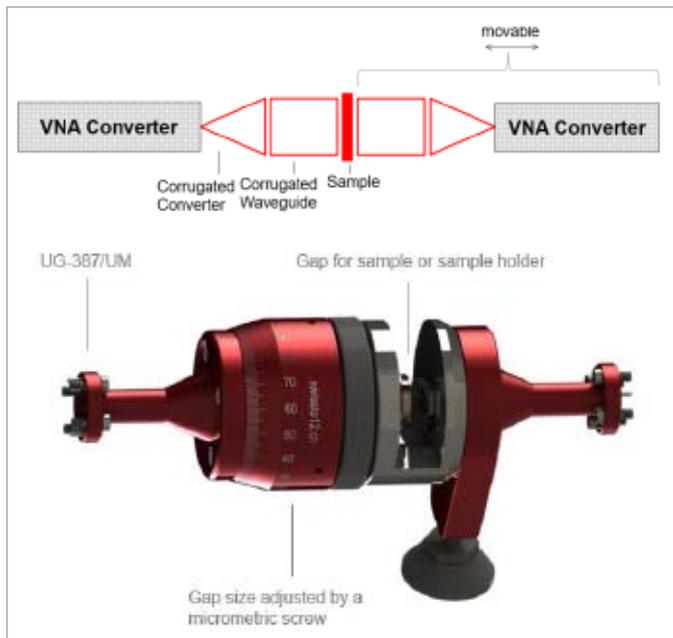


图8 波导传输/反射法测量薄膜材料夹具

| 波导型号 | 频率范围 (GHz) | 最大样品厚度 (mm) |
|--------|------------|-------------|
| WR-15+ | 45-75 | 18 |
| WR-12+ | 55-60 | 18 |
| WR-10+ | 67-110 | 18 |
| WR-8 | 90-140 | 18 |
| WR-6.5 | 110-170 | 8 |
| WR-5.1 | 140-220 | 8 |
| WR-3.4 | 220-330 | 8 |
| WR-2.2 | 330-500 | 5 |

同轴传输/反射法

同轴传输/反射法主要用于圆环状材料样品微波电磁参数的测量，测量频段宽。测量系统基于同轴传输测量法，利用矢量网络分析仪测量散射参数，并通过自动测量软件实现参数设置、数据采集与处理、数据显示与存储等功能。



图9 同轴传输/反射法测量夹具

| | |
|--------|--|
| 测量参数范围 | 介电常数 $\epsilon_r' : 1 - 50$; 介电损耗角正切 $\tan \delta_\epsilon : 0.1 - 1$; 磁导率 $\mu_r' : 0.3 - 10$; 磁损耗角正切 $\tan \delta_\mu : 0.1 - 1.5$; |
| 测量精度 | $ \Delta \epsilon_r' / \epsilon_r' \leq 10\%$; $ \Delta \tan \delta_\epsilon \leq 10\% \times \tan \delta_\epsilon + 0.05$; $ \Delta \mu_r' / \mu_r' \leq 10\%$; $ \Delta \tan \delta_\mu \leq 10\% \times \tan \delta_\mu + 0.05$; |
| 频率范围 | 0.5 GHz - 18 GHz |
| 样品要求 | 圆环形 |

表6 同轴传输/反射法主要技术参数

空间法

自由空间测量方法与自动测量系统主要用于板状吸波材料样品微波电磁参数的测量。测量系统基于自由空间传输测量法，采用TRL法直接在测量样品端面校准，利用矢量网络分析仪R&S®ZVA测量散射参数，并通过自动测量软件实现参数设置、数据采集与处理、数据显示与存储等功能。

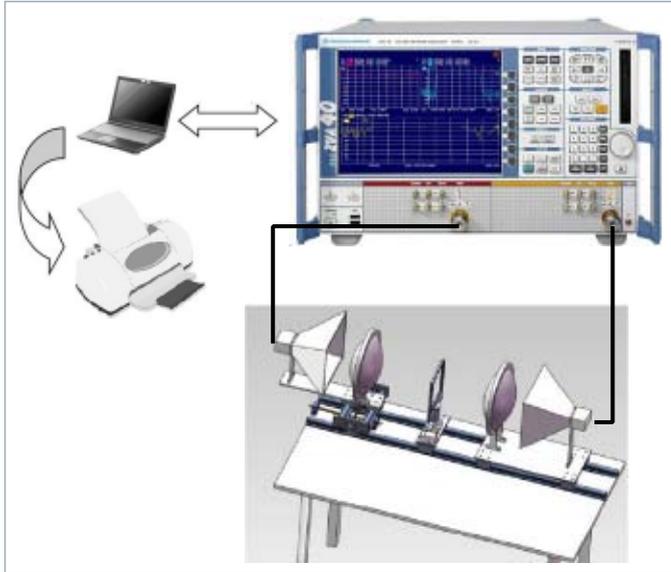


图10 空间法测量系统

| | |
|--------|--|
| 测量参数范围 | 介电常数 ϵ_r' : 1 - 50 ; 介电损耗角正切 $\tan \delta_\epsilon$: 0.2 - 1 ; 磁导率 μ_r' : 0.3 - 10 ; 磁损耗角正切 $\tan \delta_\mu$: 0.2 - 1.5 ; |
| 测量精度 | $ \Delta \epsilon_r' / \epsilon_r' \leq 15\%$; $ \Delta \tan \delta_\epsilon \leq 15\% \times \tan \delta_\epsilon + 0.2$; $ \Delta \mu_r' / \mu_r' \leq 15\%$; $ \Delta \tan \delta_\mu \leq 15\% \times \tan \delta_\mu + 0.2$; |
| 频率范围 | 8 GHz - 40 GHz |
| 样品要求 | 均匀板状 |

表7 空间法主要技术参数

同轴探针法



图11 同轴探针法测量系统

同轴探针法适用于液体材料电磁参数测量。将同轴探针放入待测液体材料中，通过测量端口反射系数的幅度相位，计算材料的介电常数与损耗角正切。

| | |
|--------|---|
| 测量参数范围 | 介电常数 ϵ_r' : 1 - 100 ; 介电损耗角正切 $\tan \delta_\epsilon$: 10^{-5} - 10 ; |
| 频率范围 | 0.01 GHz - 50 GHz |
| 样品要求 | 均匀液体或半固体 |

表8 同轴探针法主要技术参数

小结

不同测量方法的对比如下表：

| 测量方法 | | 适用材料 | 测量夹具/软件提供商 | 优点 |
|-------|----------|--------|------------------|---------------|
| 谐振腔法 | 高Q值谐振腔 | 片状固体 | 电子科技大学 | 高精度、适合测量低损耗材料 |
| | 微扰谐振腔 | 固体、粉末 | QWED | |
| | 分离式介质谐振腔 | 薄膜 | QWED | |
| 传输反射法 | 波导 | 片状固体 | 电子科技大学/Swissto12 | 宽带 |
| | 同轴 | 圆环状固体 | 电子科技大学 | 宽带 |
| 空间法 | | 片状固体 | 西安恒达微波 | 宽带、高低温 |
| 同轴探针法 | | 液体、半固体 | Speag | 简单 |

订购信息

| | |
|---------------|----------------|
| 基本单元 | |
| R&S®ZVA | 矢量网络分析仪 |
| R&S®ZNB | 矢量网络分析仪 |
| 校准件 | |
| R&S®ZV-Z53 | 300 kHz到3GHz |
| R&S®ZV-Z54 | 10 MHz到40 GHz |
| R&S®ZV-Z55 | 10 MHz到50 GHz |
| 测量夹具 | |
| 高Q值谐振腔 | 定制 |
| 微扰谐振腔 | 定制 |
| 分离式介质谐振腔 | 定制 |
| 波导传输/反射测量夹具 | 定制 |
| 同轴传输/反射测量夹具 | 定制 |
| 聚焦天线 | 定制 |
| 同轴探针 DAK-12 | 10 MHz到3 GHz |
| 同轴探针 DAK-3.5 | 200 MHz到20 GHz |
| 同轴探针 DAK-1.2 | 5 GHz到50 GHz |
| 同轴探针 DAK-1.2E | 5 GHz到67 GHz |
| 测量软件 | |
| 材料电磁特性测量软件 | 定制 |

IC测试大平台

半导体行业背景

半导体行业是现代科技的象征，伴随着近几十年现代科技行业日新月异的进步，以集成电路 (IC) 为主的半导体行业市场规 模也不断增长，现在已经成为了全球经济的重要支柱行业之一。过去5年，中国大陆半导体产业市场规模年增长率保持在10%以上，显著高于全球的增长速度

。2014年六月，工信部正式公布《国家集成电路产业发展推进纲要》，到2020年，全行业销售收入年均增速超过20%，移动智能终端、网络通信、云计算、物联网、大数据等重点领域集成电路设计技术达到国际领先水平，产业生态体系初步形成。为此，国家专门成立1200亿的集成电路产业投资基金，来进一步支持和带动产业的发展。

Transparency Market Research的市场研究报告显示，2014年，全球太赫兹组件和系统的市场规模为5600万美元，预计2023年该市场将达4.15亿美元，2015年-2023年之间复合年增长率为25.9%。

从目前的市场来看，智能终端将继续支撑集成电路产业快速发展。手机在2013年已经取代个人电脑跃居最大芯片应用领域，智能手机、平板电脑已经成为并将继续成为推动集成电路市场发展的主要力量。物联网等领域将推动集成电路产业的繁荣。物联网和可穿戴设备正在崛起，很多机构判断，在不久的将来，物联网的设备将不再仅限于智能手机、电脑等，会覆盖到智能家居、交通物流、环境保护等多个领域，物联网将是下一个推动世界高速发展的“重要生产力”，是继通信网之后的另一个万亿级市场。

与此同时，THz技术应用也将在IC领域受到越来越大的关注和发展，5G技术的开发，E波段通信技术的发展，汽车防撞雷达芯片技术的完善，都将是100 GHz频段附近的重点应用之一，可以预见，更高频的芯片设计应用，如合成孔径雷达芯片等，将带动THz IC技术上升到一个新的高度。

IC测试平台建设的意义

综上所述，半导体行业现在已经上升到国家战略的高度，未来十年将会是一个黄金发展的时期。从15年开始，国家集成电路基金已经在IC设计，制造，封装方面扶持和投资了大批的重点和龙头企业，并且从产业链的角度进行了整合优化，进一步的引导和促进半导体产业的发展，取得了良好的效果和成绩。建设一个完善且一流的IC测试服务平台，应对新的设计工艺，技术，从器件级，电路级到应用级，来服务于5G技术，E波段通信技术，汽车雷达芯片技术的发展，引领IC行业，乃至带动全国IC行业的发展，将具有非凡的意义。

一 通用射频微波芯片测试平台

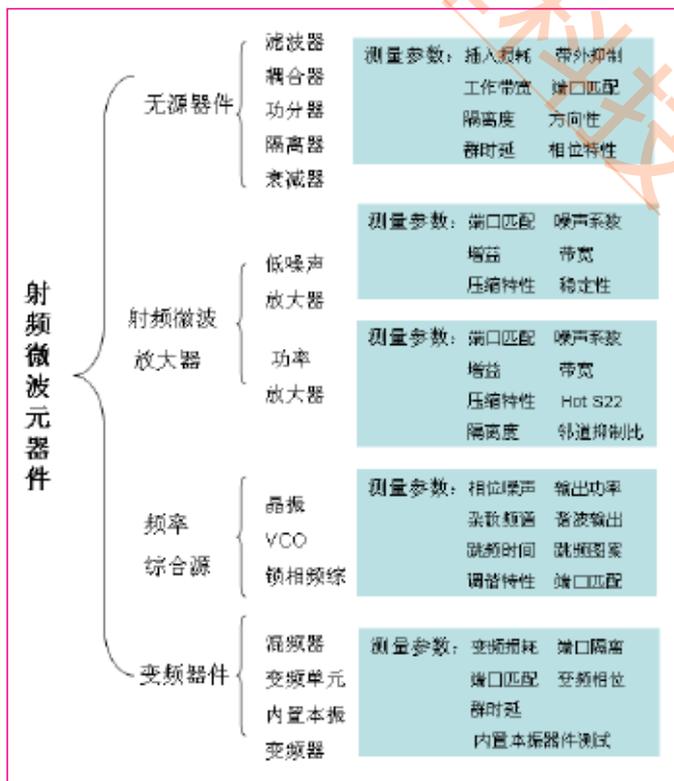
射频微波器件及芯片的发展及测试要求

中国目前在电子工业领域已经成为全球最大的基地，在移动通信、军工、元器件、半导体以及教育领域，都会出现新的要求和市场，在无线通信领域，已经迎来了4G时代，在国防军工领域，卫星通信，雷达等系统都在进行了新一轮的技术升级和发展，半导体，元器件和科研也进入了太赫兹时代，这些都离不开微波射频技术的支持和保障，同时也带动微波射频相应的技术创新和发展，可以肯定，未来的微波射频产业前景将是一如既往的光明。

射频微波元器件及芯片作为一切无线电子设备、无线通信系统和无线控制系统的基础，更是直接影响着系统的性能和功能。随着射频微波芯片技术的发展和工艺的进步，尤其是更加集成，小型化，多功能化芯片技术的发展，直接带动了无线通信，军工雷达以及日常消费应用的创新和进步。甚至是原来很难集成的无源器件如滤波器，开关，功分器等也可以通过IPD工艺技术，实现芯片化，促使各种终端模块的功能更加强大。

无论射频微波电路功能与性能如何发展，都需要通过完整的测试来评估其各方面性能与功能，判断其是否满足设计指标的性能要求。通过测试一方面可验证设计正确性，另一方面也可利用测试的性能参数可以对设计的电路进行修正和优化。微波射频电路典型的性能指标包含线性传输反射特性参数，非线性指标，噪声性能，功耗等方面。通用仪表具备很高的测试精度和完整的测试能力，能完成对低噪声放大器，功率放大器，混频器，频率综合源，滤波器等典型射频微波元器件芯片的参数进行测试分析。

射频微波电路的测试指标繁多，下面图表简明扼要的列举了常见电路类型以及测试指标：



射频器件芯片测试类型与指标

射频微波电路测试技术方案

针对上述射频微波元器件测试的需求，下图列举了通用设备种类以及其对应常见测量项目：

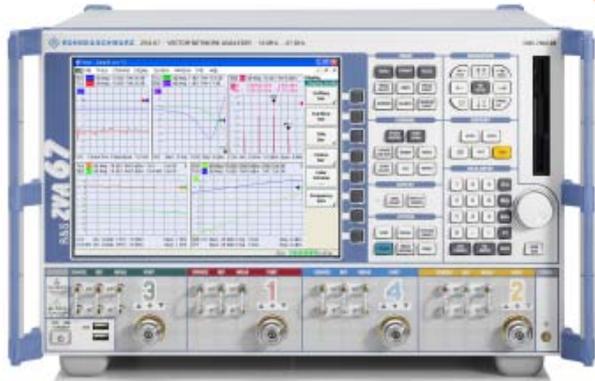
| 射 频 微 波 测 量 仪 表 | |
|--------------------------------------|---|
| 矢量网络分析仪 | 测量参数：损耗增益 压缩特性 工作带宽 端口匹配 带外抑制 噪声系数 隔离度 方向性 群时延 相位特性 稳定性 功放效率 |
| 频谱与信号分析仪 | 测量参数：频谱分布 谐波抑制 杂散测量 交调测试 邻道抑制比 占用带宽 噪声系数 模拟与数字解调分析 |
| 信号源分析仪 | 测量参数：相噪测量 杂散分析 调谐特性 调幅噪声 基带噪声 残余杂波 跳频时间 频谱测量 |
| 宽带示波器 | 测量参数：波形测量 开关时间 脉冲上下沿测试 |
| 功率计 | 测量参数：精确功率测量 |
| 信号源 | 功能：激励被测设备，如变频本振 |

通用测试仪器及其对应常见测量项目

罗德与施瓦茨公司 (R&S公司) 成立八十多年来，在测试与测量、信息技术和通信领域，一直雄踞技术前沿。作为全球最大的电子测量仪器生产厂商之一，一直以创新、精确和品质享誉世界。罗德与施瓦茨提供网络分析仪，信号源，频谱与信号分析仪，功率计，示波器，测试接收机，无线综合测试仪等设备与测试系统，结合中国射频与微波用户的具体需求，提供了相应的测试测量解决方案，满足市场用户的各种需要。R&S 仪表不仅能满足上图中所有的测试需求，也能提供一些独特的测试功能。下面按不同仪器分别予以详解。

元器件电路测试之一 矢量网络分析仪R&S®ZVA67

ZVA系列矢量网是实验室测量和产品测试最理想的选择，能够满足高动态范围需要的滤波器测试，以及放大器、混频器、接收机和发射机等需要线性和非线性的测试。



R&S®ZVA在许多方面是一款具有里程碑意义的仪器：

- 第一台内置了四个独立的，频率高达67 GHz的矢量网络分析仪，能够进行快速的放大器和混频器双音测试
- 第一台能够在67 GHz频率范围内产生相位相干信号的矢量网络分析仪
- 第一台在110 GHz频率范围内，拥有30 MHz IF带宽滤波器的矢量网络分析仪，满足放大器和混频器的脉冲测试要求

| 名称 | 参数 | 功能 |
|-------|--|--|
| ZVA67 | ■ 频率范围：10 MHz-67 GHz (最高频率可设置70 GHz) ■ 端口数量：2/4端口 ■ 内置信号源： 2端口版本-2个独立信号源 4端口版本-4个独立信号源 | ■ 4个锁相源，可输出4路相参信号 ■ 测量谐波混频器 ■ 测量混频器的交调指标(需3个源) ■ 测量多级变频链路的损耗和交调指标(需4个源) |
| | 动态范围：110 dB, typ@67 GHz 动态范围：103 dB, typ@70 GHz 输出功率：+6 dBm, typ@67 GHz 输出功率：+2 dBm, typ@70 GHz 测量带宽：30 MHz 扫描和数据传输时间：3.5us/2.9ms 多种应用测量软件 | S参数、1 dB压缩点、互调测试、矢量变频器测量、内置本振的群时延测量、脉冲信号测量，差分测量等参数测量 |

R&S®ZVA作为高端矢量网络分析除了可以进行高质量的S参数外，也提供了丰富的应用测量功能。

- 可以快速地对放大器和混频器进行双音测量
- 频率高达67 GHz，并可生成相位相参信号
- IF 带宽可高达 30 MHz，可以实现对放大器和混频器的脉冲测量，支持脉冲点、平均脉冲和脉冲包络等测量方法
- 可以对带或不带本振的混频器的变频损耗进行相位和群延时测量
- 可以对放大器和混频器进行谐波、压缩点、互调和 Hot S22测量
- 实现了无噪声源噪声系数定义的新方法
- 两个内部脉冲发生器
- 通过ZVAX24，实现了内部脉冲调制器和合路器
- 嵌入/去嵌入通过虚拟网络实现阻抗匹配
- 支持真正的差分测量，可以描述平衡设备的非线性效应
- 多种校准技术：TOSM，TRL/LRL，TOM，TRM，TNA，UOSM 和 AutoCal

信号的产生和分析之一—矢量信号发生器R&S®SMW200A



SMW200A是通用射频信号，新型宽带通信系统、3G和4G基站验证或航空航天和国防领域理想的信号发生器。

内置基带、最高2000 MHz的I/Q调制带宽可满足第4代移动通信标准 (例如，LTE-Advanced和IEEE 802.11ac)，因此，SMW200A的设计可满足未来需求。它的模块化可扩展结构，使用户能够灵活的选择配置以适应他们的应用，以及根据需要升级各种选项。

可以添加第2条射频路径，以及在不影响信号质量的情况下支持多达2个基带模块和4个衰落模拟器模块。因此，SMW200A可以创建先前需要多台仪器完成，甚至完全不能实现的信号场景。从可达8x2的MIMO和包括带衰落的LTE-Advanced载波聚合信号到多标准无线技术，以前从没有单台仪器能够提供这样完整的信号生成能力。

如果需要多于2条射频路径，可以外接连接SGMA信号发生器。基于触摸屏的直观操作理念可为用户提供信号配置的全局视图。各种复杂配置场景一目了然。

| 数字通信标准选件 (选择) | | |
|-----------------------------------|---|---|
| 标准/技术 | 选件 | 主要特点 |
| 5G空中接口候选方案 | R&S®SMW-K114 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 支持UFMC、FBMC、GFDM和f-OFDM ■ 序列长度、子载波总数/占用数、子载波间隔、循环前缀等灵活参数化 ■ 灵活分配用户或单个分配 |
| LTE/LTE-Advanced | R&S®SMW-K55/-K69/-K81/-K84/-K85/-K112/-K113 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 符合3GPP LTE版本8, 9, 10, 11, 12 ■ FDD和TDD ■ 下行链路 (OFDMA) 和上行链路 (SC-FDMA) ■ 载波聚合 ■ 支持符合3GPP TS 36.141的上行链路闭环基站测试 ■ LTE测试用例向导 |
| 3GPP FDD/HSPA/HSPA+ | R&S®SMW-K42/-K83 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 符合3GPP FDD版本11 ■ 下行链路和上行链路 ■ HSDPA H-sets ■ 高阶调制, MIMO, CPC ■ 支持符合3GPP TS 25.141的基站测试 ■ 3GPP测试用例向导 |
| GSM/EDGE/EDGE Evolution | R&S®SMW-K40/-K41 | <ul style="list-style-type: none"> ■ MSK, FSK, AQPSK, 8PSK, 16QAM和32QAM调制 ■ 采用GSM, EDGE和EGPRS2时隙的混合帧 ■ 支持VAMOS ■ 支持高符号率 (325 kHz) ■ 用交替帧内容生成实际测试场景的“Framed double”序列模式 |
| CDMA2000® | R&S®SMW-K46 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 符合3GPP2 C.S0002-C ■ 在前向链路无线配置RC1到RC5以及RC10, 在反向链路无线配置RC1到RC4 ■ 包括在IS-2000中的所有信道编码模式 |
| 1xEV-DO Rev. A, B | R&S®SMW-K47/-K87 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 前向链路和反向链路 ■ 物理层子类0和1, 2或3 ■ 采用最多16条并发信道的多载波场景 |
| WLAN IEEE 802.11a/b/g/n/j/p/ac | R&S®SMW-K54/-K86 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 支持所有强制性物理层模式 ■ 具有最大160 MHz传输带宽的VHT帧 ■ BPSK, QPSK, 16QAM和256QAM调制 ■ 采用4枚发射天线的MIMO模式 ■ 支持 (11a/b/g/j/p), 11n或11ac的、混合帧结构 |
| WLAN IEEE 802.11ad | R&S®SMW-K141 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 符合IEEE 802.11ad-2012标准 ■ 支持控制模式、单载波模式、OFDM模式和低功耗单载波模式 ■ 调制编码方案0到31 ■ 支持聚合的 MPDU |

通信信号生成

| R&S®SMW200A能够与许多其它罗德与施瓦茨公司仪器一起使用 | | | |
|----------------------------------|------------------|---|--------------------------------|
| R&S®SMW200A 功能/连接 | 相关选件 | 罗德与施瓦茨合作伙伴仪器 | 应用举例 |
| 数字基带输入 | R&S®SMW-B10 | 例如, R&S®CMW500 宽带无线综测仪 | R&S®CMW500做外部I/Q源, 例如, 作为信令 |
| 数字基带输出 | R&S®SMW-K18 | 例如, R&S®EX-IQ-Box 数字信号接口模块 | 以不同格式输出数字基带信号, 例如, 遵循CPRI标准 |
| 模拟I/O输出 | R&S®SMW-K16/-K17 | 例如, R&S®SGT100A信号发生器 | 提供附加的射频路径 |
| R&S®NRP功率探头连接器 | — | 例如, R&S®SGS100A信号发生器 R&S®NRPxxS功率探头, R&S®NRP-Z28/-Z98电平控制探头 | 高精度功率测量, 结果显示在 R&S®SMW200A上 |

不同格式信号输出

主要特点

- 频率范围从100 kHz到3 GHz, 6 GHz, 12.75 GHz, 20 GHz, 31.8 GHz或40 GHz
- 可选的第二条射频通道频率范围从100 kHz到3 GHz, 6 GHz, 12.75 GHz或20 GHz
- 内部基带信号发生器可产生最高2 GHz I/Q调制带宽(射频带宽)
- 提供所有重要的数字通信标准选件
- 可选具有最高160 MHz带宽的内置衰落模拟器
- 优异的调制质量, 例如160 MHz WLAN IEEE 802.11ac信号, EVM可达到-49 dB(实测值)
- 高端脉冲调制, 开/关比>80 dB, 上升/下降时间<10 ns
- 杰出的频谱纯度(1 GHz、20 kHz偏移时: SSB相位噪声-139 dBc(典型值))
- 提供相参选件, 用于波束成形等应用
- 支持所有主要MIMO模式, 包括3x3, 4x4, 8x2, 2x8和4x2x2
- 通过触摸屏, 采用框图结构, 操作直观

信号的产生和分析之一—信号与频谱分析仪R&S®FSW



新款高性能FSW信号与频谱分析仪, 提供了低相位噪声, 大分析带宽和简明直观的操作, 除可以进行信号的频谱分析外也可对宽带数字信号进行解调分析, R&S®FSW主要功能有:

- 可测量发射机输出信号的频谱分布, 如信道功率、信道带宽, 带外发射门限、谐波发射, 交调进行测量。
- 可与噪声源配合进行接收机以及增益模块的噪声系数与增益测量。
- 自身具备良好的相位噪声特性,可自动测量信号的相位噪声曲线。
- 脉冲解调分析的功能可完成对各类脉冲调制如:线性调频、Barker及其他相位编码雷达信号的测试, 也可对最大10万个脉冲波形进行统计分析, 分析的参数包括脉冲上升时间、下降时间、重复周期等。
- 解调各种数字调制信号, 并对调制质量进行分析, 如星座图, 眼图等。
- 可配备512 MHz实时解调带宽, 对宽带跳频与OFDM信号进行信号分析。
- 可配备5 GHz带宽模拟中频输出口与示波器先结合可实现超宽带信号分析。
- 配备FSW-B71选件, FSW能够分析模拟基带信号。FSW-B17选件提供数字基带测量功能。

| 测量应用 | 测量参数 | 测量功能 |
|---|---|--|
| R&S®FSW-K6 脉冲测量 | <ul style="list-style-type: none"> ▮ 脉冲参数: 脉冲宽度、脉冲重复率、脉冲重复间隔、工作比、上升/下降时间、调整时间 ▮ 频率: 载波频率、脉冲间频率差、线性调频斜率、频偏、频率误差 ▮ 功率: 峰值功率、平均功率、峰-均功率、脉冲间功率 ▮ 相位: 载波相位、脉冲间相位差、相位偏差、相位误差 ▮ 幅度下垂、纹波、冲宽度 | <ul style="list-style-type: none"> ▮ 振幅下垂、纹波、过冲宽点脉冲测量: 频率、幅度、相位对脉冲、所有参数的趋势和直方图 ▮ 脉冲统计: 标准差、平均值、最大值、最小值 ▮ 脉冲表 ▮ 用户定义的测量参数 |
| R&S®FSW-K7 单载波AM/FM/φM 调制信号的调制分析 | <ul style="list-style-type: none"> ▮ 调制深度 (AM) ▮ 频率偏移 (FM) ▮ 相位偏移 (φM) ▮ 调制频率 ▮ THD和SINAD ▮ 载波功率 | <ul style="list-style-type: none"> ▮ AF频谱 ▮ RF频谱 ▮ AF时域显示 ▮ AF滤波器 (低通和高通) ▮ 加权滤波器 (CCITT) ▮ 静噪功能 |
| R&S®FSW-K17 多载波群延迟测量 | <ul style="list-style-type: none"> ▮ 群延迟 (绝对和相对) ▮ 幅度 ▮ 相位 | <ul style="list-style-type: none"> ▮ 高达160 MHz的信号捕获带宽 ▮ 元件和变频器测量校准 (可加载和保存校准数据) ▮ 可配置的多载波方案 |
| R&S®FSW-K18 放大器测量 ¹⁾ | <ul style="list-style-type: none"> ▮ AM-AM, AM-PM, EVM ▮ AM-PM和AM-AM曲线 ▮ 同步测量放大器和RF信号的电流和电压 ▮ 包络跟踪放大器的功率附加效率 | <ul style="list-style-type: none"> ▮ 通用放大器测量 ▮ 数字预失真 ▮ 控制和同步R&S®SMW200A矢量信号源和RF信号的电流和电压 |
| R&S®FSW-K30 基于Y因子方法的噪声系数和增益 测量 | <ul style="list-style-type: none"> ▮ 噪声系数 ▮ 噪声温度 ▮ 增益 ▮ Y因子 | <ul style="list-style-type: none"> ▮ 分析仪的噪声校正 (2级校正) ▮ 对频率转换的DUT的测量 ▮ 变频测量中控制信号源作为LO ▮ SSB和DSB |
| R&S®FSW-K40 相位噪声测量 | <ul style="list-style-type: none"> ▮ 单边带相位噪声 ▮ 剩余FM和剩余φM ▮ 抖动 | <ul style="list-style-type: none"> ▮ 1 Hz ~ 10 GHz的频偏范围 ▮ 不同频偏范围的分辨率带宽和平均次数的选定 ▮ 可定义寄生FM/φM评估范围 ▮ 信号跟踪 ▮ 可选杂散辐射抑制 |

主要数据

- ▮ 频率范围2 Hz~85 GHz (采用罗德与施瓦茨公司外部谐波混频可扩展到高达500 GHz)
- ▮ 相位噪声低, 1 GHz载波, 10 kHz频偏时, 可达-137 dBc (1 Hz)
- ▮ WCDMA ACLR测量时, 动态范围 (打开噪声消除功能), 高达- 88 dBc
- ▮ 高达5 GHz分析带宽
- ▮ 8 GHz以下, 总测量不确定度<0.4 dB
- ▮ 实时频谱带宽高达512 MHz
- ▮ 12.1" (31 cm) 高分辨率触摸屏, 操作方便
- ▮ 多个测量应用可并行运行和显示

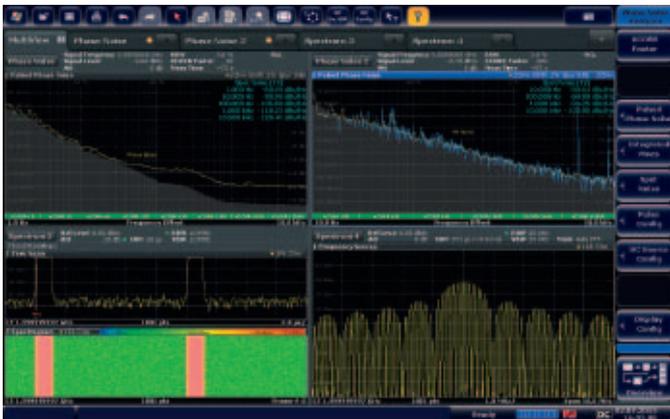
相位噪声测试之一—相位噪声和VCO测试仪R&S®FSWP



在系统中，频综很重要的应用是作为本振在射频电路部分驱动混频器。在变频过程中，为了获得最小的变频损耗，以及非线性产物的最优抑制，本振的输出电平需要恰当的设计。此外，本振的相位噪声会搬移到变换之后的频段，保证良好的相位噪声特性也是对本振的重要要求之一。

频率综合器的测试参数主要包括：相位噪声，非谐波杂散，频率准确度，输出功率，频率稳定度以及频率切换时间等，罗德与施瓦茨全新的FSWP相位噪声分析仪和VCO测试仪，可以以非常高的灵敏度进行相位噪声的测量。还可以进行瞬态测量、VCO特性测量。内置频谱分析仪，可进行频谱测量。实现对频综、VCO等器件和模块的全方位测试。

FSWP相位噪声分析仪和VCO测试仪为雷达应用以及频率合成器、恒温晶体振荡器 (OCXO)、介质共振腔振荡器 (DRO) 和VCO的开发与制造提供了最优测试解决方案。FSWP可轻松配置以适用于所需的应用。此仪器内置低噪声本振，可测量大部分市售的频率合成器和振荡器，无需任何附加选件。FSWP面向高端应用，可配置第二接收路径以使用互相关测量法并增加灵敏度 (最高增加25 dB，取决于互相关次数)。得益于极佳的内部源和基本数字化的架构，此分析仪的测试速度快于对鉴相器输出信号进行数字化的测试系统。



FSWP可一键测量相位噪声，甚至可测量脉冲源的相位噪声。如加配一个内部源，则此测试仪还可测试单个组件的附加相位噪声。以往，只有使用外部源、功分器和移相器的昂贵且复杂的系统才具备此功能。

迄今为止，仍需要依靠极其昂贵且复杂的系统来测量脉冲源相位噪声，如雷达应用中所用的脉冲源的相位噪声。要实现稳定的测量，需要精确的脉冲参数信息以及极大的耐心。配置FSWP-K4选件后，FSWP可一键执行这些测量。FSWP先记录信号并计算所有的脉冲参数，然后解调信号并显示相位噪声和调幅噪声。

信号与频谱分析选件基于FSW，具有独一无二的射频性能和高灵敏度。此分析仪的低相位噪声使用户能够精确分析调制、测量具有高动态范围的相邻信道的功率并测量与载波非常接近的杂散发射。

主要数据和特点

- 频段至8 /26.5/50 GHz
- 互相关和极低噪声内部参考源实现相位噪声测量的高灵敏度
- 1 GHz载波频率和10 kHz频偏时，典型相位噪声值为 -172 dBc (1 Hz)
- 调幅噪声和相位噪声同步测量
- 脉冲源相位噪声一键测量
- 内部源适用于测量附加相位噪声，包括脉冲信号的相位噪声

时频域信号分析之一—宽带示波器R&S®RTO

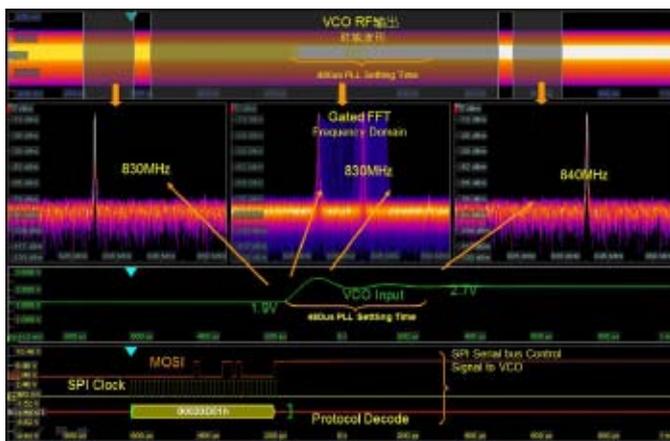


RTO示波器具有极佳的信号保真度、极高的采样率和全球第一个实时数字式触发系统，结构紧凑。目前RTO系列示波器的最大带宽为6 GHz，满足常规测试需求。该系列示波器具有硬件加速的测量和分析功能。

对于瞬间毛刺信号的捕捉，以往的示波器波形捕获率低，往往很难抓到，R&S®RTO高达每秒一百万次的捕获率可大大提高捕获概率、减小等待时间，提高测试与诊断能力。

RTO示波器具备90多个测量功能，可用于复杂设计的调试。利用快速模板测试或强大的FFT分析功能，可查找到罕见的信号故障。历史功能可用于回顾过去的记录，以识别出故障发生的原因。对于一些有挑战性的分析任务，该示波器可通过选件扩展，用于协议解码、抖动、一致性测试和矢量信号分析等。

对于测量小信号时，以往的示波器自身的噪声大且小垂直刻度下带宽受限，很难真实观测小信号，而R&S®RTO自身噪声极小且可实现全量程范围内的满带宽测量，确保小信号的测量精度。



主要数据

- 极低的本底噪声，1 mV/div量程和1 GHz带宽下低至100 μ V
- 使用单核模数转换器，动态范围更大
- 对于1 mV/div量程，全测量带宽高达6 GHz
- 高分辨率模式，垂直分辨率高达16位
- 存储深度高达800 MSa
- 通道隔离度> 60 dB，避免高频信号串扰

功率测试分析之一 功率计R&S®NRP2 + NRP-Zxx



精确测量射频功率是电子测试与测量领域中最具挑战性的任务之一，NRP2功率计是研发、生产、维修及校准实验室等众多应用领域的理想工具。除了NRP2基本单元外，还有许多可供各种测量的探头。复杂的数字调制信号（例如WCDMA和WiMAX™等无线标准）的处理与连续波信号、模拟调制载波（例如AM、FM）、脉冲信号一样容易。

每个NRP-Zxx探头都是一件独立的测试仪器，可直接通过USB操作。探头通常使用NRP-Z4无源USB适配器进行连接。无论何种型号，测量前都无需校准，因为校准数据在出厂前已经直接存储在探头内。

R&S®NRP-Z系列中的功率探头R&S®NRP-Z85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，与其他R&S®NRP-Z系列中的功率探头探头一样，其可连接功率计主机NRP2或通过USB接口直接与PC机连接后可以进行高精度的功率测量。除平均功率测量外，R&S®NRP-Z85也可进行时域功率测量，它的分析带宽高达30 MHz（探头上升时间<13ns），非常适合脉冲信号时域分析。另外，R&S®NRP-Z85也可以进行精确的平均值功率测量，功率电平范围为：-60 dBm至+20 dBm，频率范围：50 MHz至40 GHz。

NRP-Z5x热探头具有卓越的测量精度，是从DC到110 GHz频段功率测量的首选仪器，特别适合于要求极高精度的场合，例如微波实验室的测量，在片测试等。

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。

主要特点：

- 性价比高、操作简单：通过USB连接便携式计算机/PC进行探头操作
- 全功率、全频段测量，从DC到110 GHz，从-67 dBm到+45 dBm
- 三路径二极管功率探头，高达90 dB的动态范围
- 使用宽带功率探头精确分析包络功率
- 具有顶级精度的热功率探头
- 可以同时连接多达4个NRP-Zxx至NRP2基本单元

二 射频微波芯片高端拓展测试平台

基于上述的矢网，信号源，频谱仪，示波器等仪表，我们可以进行放大器，混频器，锁相环，收发机芯片，AD/C芯片，以及IPD元件的常用测试需要，同时，基于这些仪表，还可以进行平台扩展，进一步的搭建出更加高端的太赫兹电路测试平台，芯片在片测试平台以及用于功率放大器设计的高端矢量负载迁移平台，来支持客户的先进电路设计测试需求。

毫米波太赫兹电路测试平台

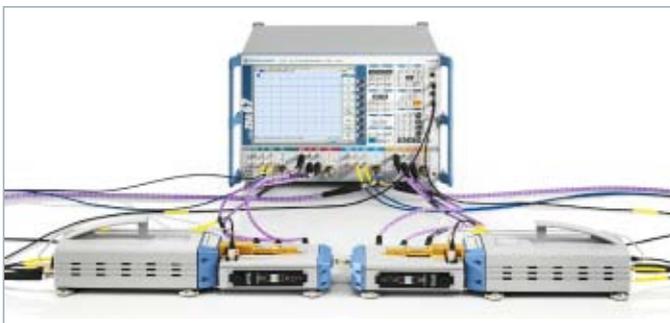
毫米波在通信，雷达，制导，遥感，射电天文学和波谱学方面都有重大的意义。利用大气窗口的毫米波频率可以实现卫星地面通信或地面中继通信。利用毫米波天线的窄波束和低旁瓣性能可以实现精密跟踪雷达和成像雷达。高分辨率的毫米波辐射计适用于气象参数的遥感。用毫米波和亚毫米波的射电天文望远镜探测宇宙空间的辐射波谱可以推断星际物质的成分。太赫兹波是指频率在0.1THz到10THz的电磁波，可以广泛应用在宽带通信，雷达，电子对抗，电磁武器，天文学，医学成像，无损检测，生化检查等领域。毫米波太赫兹的应用对测试测量也提出了一系列的要求，罗德与施瓦茨公司提供了频段扩展的网络分析仪，信号源，信号与频谱分析仪等，满足毫米波太赫兹信号的生成，分析及元器件的测试需求。

太赫兹器件测试分析

毫米波太赫兹矢量网络分析仪基于ZVA24/40/50/67等网络分析仪和变频器进行频率扩展。

毫米波/太赫兹扩展变频器：

射频信号经过倍频扩展至毫米波太赫兹频段，和谐波混频器，本振信号及相应的定向耦合器形成参考支路，测量支路。



更高频段的扩展：

支持RPG或VDI矢量网络分析仪扩展，ZVA与RPG或VDI变频

器的结合，可完成1 THz以上的矢量网络分析。

毫米波/太赫兹的部件大多数是波导接口。R&S的毫米波/太赫兹波段支持T (直通)，S (短路)，Offset Short (偏置短路，在测试端口与短路之间增加四分之一波长波导段)，M (匹配，固定或滑动负载)

太赫兹信号分析

信号分析以频谱分析仪 (信号分析仪) 为基础，通过相应频段的谐波混频器，将毫米波太赫兹信号下变频到低频段进行分析。R&S信号分析仪系列仪器FSW26/40/50/67/85，FSWP26/50等通过外接谐波混频器，可以进行高达500 GHz的信号分析。其中，信号分析仪提供谐波混频器的本振信号，经过变频后的信号 (中频) 直接接到信号分析仪的第二级中频接收端。利用信号分析仪的后续部分进行处理和分析。使IF与LO信号分离的双工器可以存在于谐波混频器中，也可以使用频谱仪中自带双工器。

通常三端口谐波混频器中集成了双工器，内部没有集成双工器的谐波混频器只有两个端口，IF与LO共用一个射频端口。



太赫兹信号产生

毫米波太赫兹信号的产生以信号源为基础，通过倍频获得。R&S的信号源SMF100A系列具有大功率低相噪的特点，能产生43 GHz以下的高质量信号，同时支持调频、脉冲、脉内线性调频等调制方式。通过SMZ系列倍频器(有源)可以获得高达170 GHz的信号。由于倍频的非线性，调制后的毫米波信号可以实现FM， Φ M以及脉冲调制，同时能够实现脉内线性调频信号。

产生的信号电平可达到+3 dBm (110 GHz)，并可以利用倍频器内置的电子和机械衰减器，实现信号电平的衰减调节。



芯片在片测试平台

器件的在片测试主要应用在器件建模，工艺优化以及毫米波测试方面，主要的测试参数有S参数，噪声系数，相位，功率，P-1dB，三阶交调等，对比普通器件测试，在片测试的关键是如何进行电路测试的连接，测试校准的实现，以及如何准确一致的测试全部器件参数。器件的连接主要在于探针台系统和测试夹具的选择，罗德与施瓦茨公司则针对测试校准，参数测量方面提供非常全面及专业的解决方案。

矢量网络分析仪 (ZVA、ZVT) 可实现多种器件参数的在片测量，包括标准S参数、时域测量、变频测量、真差分测量(混合S参数)、脉冲S参数测量、噪声系数测量等，并实现单次连接全部器件参数测试的完整方案。

矢量网络分析仪 (ZVA)，配以外部变频器 (ZVA-Zxx或R&S®ZCxx) 可将频率范围扩展至500 GHz以。

NRP-Z58系列功率探头可将功率测量的频率范围扩展至110 GHz。

在片测试的SCDC解决方案

在片测试时，芯片的每次连接都会导致电路参数和测试数据

的改变，影响器件建模和工艺优化，以及器件的准确测量。利用R&S矢量网络分析仪 ZVA，一次连接即可实现多种器件参数的在片测量，包括标准S参数、时域测量、变频测量、真差分测量(混合S参数)、噪声系数测量等，对于功率器件，也可以实现脉冲S参数的测量，确保所有电路参数的准确可靠一致。

兼容MPI探针台，可以实现毫米波太赫兹器件的在片测量。MPI QAlibria软件支持矢量网络分析的校准。由于ZV-Zxx的扩展器采用无风扇的设计，工作过程中无噪声和振动，特别适合探针台及在片测量。



专利技术提供在片测试最佳校准方法

R&S矢量网络分析仪不仅支持所有的常见同轴DUT校准方法，也支持在片测试装置中DUT测量的校准方法。设计有图形化向导，可以引导用户按步完成校准。

TRL/LRL校准(直通、反射、传输线/传输线、反射、传输线)，用于基于电路板的测试架构和晶片上的应用。

TRM校准(直通、反射、匹配)，用于测试夹具应用。

UOSM校准(未知直通、开路、短路、匹配)，用于带各种不同类型输入和输出连接器的DUT和带未知直通标准的校准任务。相较于传统的适配器去除校准方法，该方法可以将校准步骤数从14减至7。因此，可以节省时间且降低了校准错误的风险。

MPI探针台系统

旺矽科技股份有限公司 (MPI Corporation) 携手罗德与施瓦茨开发了高精度晶圆研发测试解决方案，其中包含了MPI晶圆探针台系统与QAlibria™校正软件，提供射频与毫米波组

件及集成电路 (IC) 研发人员从校正、模拟、设计、验证到除错等完整的晶圆研发测试解决方案；此探针台系统提供易于操作与高准确度的手动测试平台，并注入多项独特的设计概念，QAlibria™校正软件直接安装于R&S®ZVA高阶矢量网络分析仪中进行S参数测量，将大幅提升测试准确度并加速射频电路设计。

MPI晶圆探针台系统的气静压载台设计，采用单臂气浮式控制，大幅加速XY轴定位与晶圆装载速度，精确度可达25x25mm XY-Theta微米移动。在平台升降的设计上，可达1 μm的高精确度，采接触、分离 (Separation, 300 μm) 到装载 (Loading, 3 mm) 三段式设计，并配备安全锁避免意外发生造成探头或晶圆的损坏。精巧且刚性的平台设计，最多可容纳10个DC或4个RF微定位，满足各种不同的应用需求。

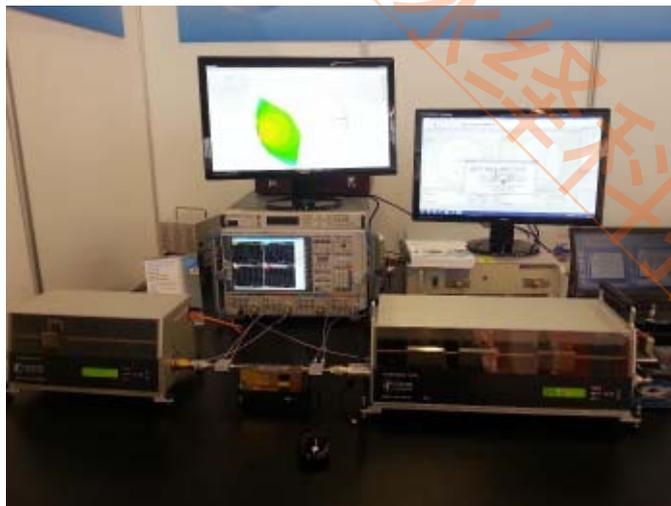
MPI QAlibria™免费校正软件，可进行精确且可重复的S参数测量，快速掌握组件的集肤效应和介电损耗，精确地搜集更高阶的谐波频率等测试数据。R&S®ZVA支持频率范围达110 GHz，极高的动态范围与输出功率、及快速的测量速度，为毫米波频段主动及被动组件测量的最佳解决方案；通过搭配R&S 毫米波转换器可延伸R&S®ZVA频率范围至500 GHz。R&S®ZVA于晶圆测量上，可同时搭配4个频率转换器进行毫米波差动测量。R&S®ZVA亦可执行微波频段之混频器及脉冲测量。

精密设计的TS150-THZ探针台系统、高阶毫米波MP80微定位器 (MicroPositioner)，以及结合高倍率及工作距离的MPI SZ10或MZ12光学显微镜，尽可能地缩短了毫米波太赫兹网络分析仪变频器 and 待物之间的距离，除了实现最短信号传输路径之外，更确保最佳测量方向性及精确度。

先进负载牵引测试平台

负载牵引系统介绍

负载牵引 (LOADPULL) 系统用来进行功率放大器的参数优化，可以准确确定功率放大器的最优直流工作点，最大输出功率，最高效率，最优线性，最优噪声匹配和最佳功率匹配点等，一般来说，负载牵引系统都是由阻抗调谐器 (TUNER)，辅助器件和测试仪器构成，对于功率放大器的在片测试，还需要探针台系统联合构建。从测试方法上讲，负载牵引系统可以分为传统负载牵引和现代负载牵引两类。传统无源负载牵引主要由信号源，TUNER，功率计和频谱仪组成，加上负载牵引测试软件就可进行功放的优化测试，对于无源的测试附件及TUNER等还需要网络分析仪进行校准。现代负载牵引除了上述设备之外，还需要谐波接收机，通常由网络分析仪实现，可以进一步的测试PAE，同时简化系统的配置，进一步的，还可以搭建更为高效先进的系统。



负载牵引系统

谐波负载牵引的作用

无论是卫星，雷达，还是基站，手机的应用，对于功放效率的要求都是很高的，而且可以说是越高越好。因此提高功率放大器的效率，尤其是功率附加效率，成为功放设计优化的重中之重。谐波阻抗，特别是二次和三次谐波阻抗优化对效率的改善已经得到了功放设计师的广泛认可，但如何优化谐波阻抗确是一个难题，利用谐波阻抗调谐器，扫描改变阻抗和相位特性，是一个非常有效的解决方案。

矢量LOADPULL测试系统

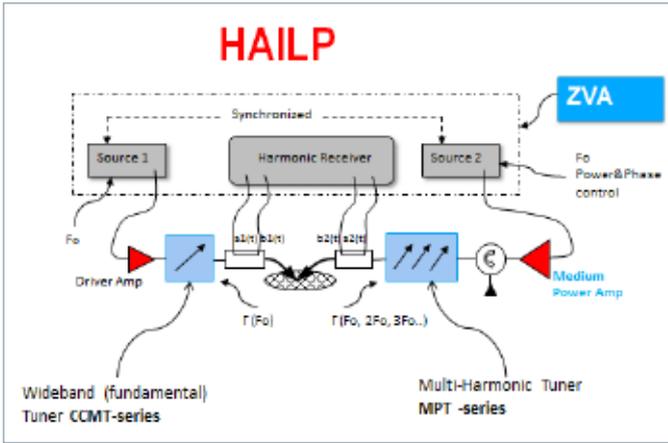
矢量LOADPULL系统利用矢量网络分析仪，TUNER，双向耦合器和DUT组成。这里不需要额外的信号源，频谱仪，信号的激励和测量都由矢网来完成。同时，由于定向耦合器的加入，真正激励到功放输入端的入射和反射功率都能通过矢网测得，输出功率也可以通过矢网接收机测得，从而可以准确地进行PAE的测试。同时该系统的测试速度也比传统的LOADPULL系统快几十倍。

有源负载迁移和预匹配技术

为了减小插入损耗的影响，提高 Γ 值，通常采用反向有源功率注入的方法，即有源负载牵引的方法。要得到足够的 Γ 值，就需要一个很大的反向注入功率，通常一个信号源提供的功率是不够的，就需要额外的大功率放大器来对功率进行放大，因此整个方案需要信号源，滤波器，隔离器，放大器，TUNER等，大大增加了系统的成本和复杂度。一个更好的解决方案是采用预匹配技术，即结合机械TUNER和有源功率注入为一体的混合负载牵引，由机械TUNER提供一个较大的初始 Γ 值，在此基础上进行功率注入，这样在一个较小的注入功率下，就可以实现非常接近1的 Γ 值，省掉额外的功率放大器，降低系统复杂度和成本。

矢量有源谐波负载牵引系统

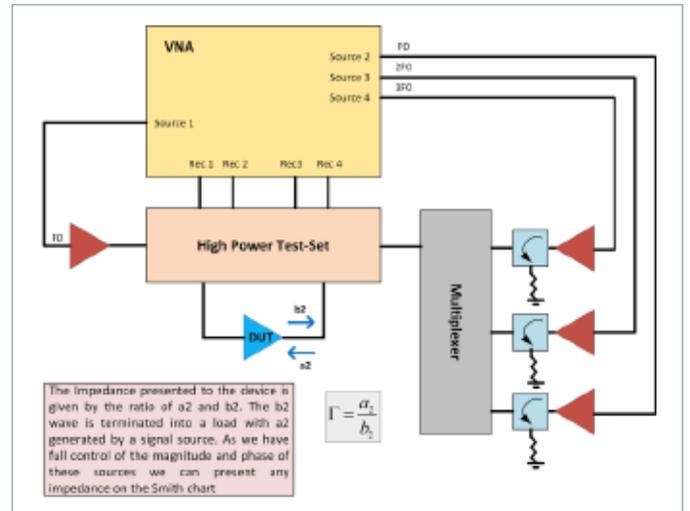
结合上述的负载牵引，矢量负载牵引，谐波负载牵引，以及有源负载牵引的方法，我们就可以实现一个非常先进的，功能更强更完善，准确度更高，同时也更简洁紧凑的负载牵引系统，即矢量有源谐波负载牵引系统，在整个SMITH圆图范围内调谐功放的基波和谐波阻抗，测量最大功率，PAE等指标，全方位的进行功率放大器的设计优化。



矢量有源谐波负载牵引

R&S先进矢量有源谐波负载牵引技术

R&S的网络分析仪ZVA24/40/67，内部带有4个激励源，可以实现基波，二次谐波和三次谐波的有源信号产生，协同FOCUS公司独有的MPT多谐波TUNER，可以同时对基波，二次谐波和三次谐波进行有源阻抗调谐，加上FOCUS的预匹配技术，大大减小所需要的反向注入功率，可以省掉外部的放大器和外部的信号发生器，降低了系统的复杂度，提高测试效率和精度。由于内置4源的矢量是R&S独有的，因此整个方案是业内唯一的可以同时做三次谐波矢量有源负载牵引的最简洁高效的系统，实现对功率放大器最完整的阻抗调谐和优化。



R&S先进矢量有源谐波负载牵引技术

利用该技术，可以非常高效的进行功率放大器的效率优化，提升整个放大器的性能指标，同时节省大量的时间成本，是进行高性能功率放大器设计的非常行之有效的方案。

三 无线和IoT芯片扩展测试平台

在单个电路的基础上，则是用于各种应用的收发电路芯片。收发电路是通信系统及终端中必不可少的部件，广泛应用于无线通信，卫星，军事，雷达以及IoT等诸多电子领域。收发机的测试是一项系统性的工作，包括了接收机测试，发射机测试以及收发机中子模块的测试，罗德与施瓦茨提供了全系列的信号发生器，信号与频谱分析仪，网络分析仪，示波器，功率计等，可以满足不同标准，频段，系统的收发机的测试需求。在第二部分中，我们介绍的微波射频测试平台，也同样可以满足收发芯片电路本身的测试需求。甚至对于雷达等国防军工应用，由于大多数都不涉及信令和协议的测试，用高端的信号发生器和信号与频谱分析仪就可配置完成系统级测试的需求，对于无线通信来说，很多都有信令或协议的测试需求，还需要无线综测仪等仪器来完成相关的系统测试。这里着重介绍的是和具体应用及协议结合起来的系统级功能性的综合测试平台。

无线技术的发展趋势

第五代移动通信技术，简称之为5G，是继目前4G LTE部署后移动通信标准的下一个主要阶段。2015年，ITU发布了5G愿景建议书，提出了IMT-2020系统的目标、性能、应用和技术发展趋势、频谱资源配置、总体研究框架和时间计划、后续研究方向等。在应用场景方面，未来5G系统将支持增强的移动宽带（eMBB）、具有高可靠性和超低延迟的通信（uRLLC）以及大规模机器间通信（mMTC）三大类主要应用场景。

不管5G无线接入还是5G核心网，将来都是由LTE，LTE-A，及LTE-A Pro的不断演进，同时融合新的5G接入技术的标准化两者结合在一起构建而成的过程。从2G开始，3GPP是推动移动通信国际化的国际组织，3GPP在进行5G相关的标准研究工作，已经完成R14版本。后续形成的R15为第一版5G标准，而R16将是完整的5G标准。2017年3月，3GPP RAN#75次会议通过了5G加速的提案。提案确定了5G的提速版本时间表：2017年12月完成Non-StandAlone（NSA）标准，2018年3月冻结标准；2018年6月完成StandAlone（SA）标准，9月冻结标准。到2019年至2020年，全球的一些运营商发布5G预商用网络，或5G商用网络。

随着物联网技术的快速发展，物联网行业以指数级的速度在飞速前进。在大数据和大连接的背景下，物联网应用越来越广泛。物联网技术主要分为两大组成部分，一部分是广域网通信技术（LPWAN），其中工作在授权频段的物联网技术以NB-IoT和eMTC为代表，而非授权频段工作在非授权频段，

如Lora、Sigfox等。另外一部分是以Zigbee、WiFi等为代表的短距离通信技术。每种技术都有各自的优缺点和应用场景，这使得在物联网大连接时代的技术出现百花齐放、百家争鸣的特点。

在授权频段的广域网通信技术中，目前主要包括EC-GSM，eMTC以及NB-IoT。而NB-IoT凭借大连接，广覆盖，低功耗，低成本这些特点使得其在成立之初就备受关注，3GPP于2016年6月完成了NB-IoT（Release13）标准核心部分，之后的性能部分和一致性部分在同年9月和12月快速制定完成。进入2017年以来，中国三大运营商分别宣布将采用NB-IoT技术部署基站设备，芯片厂商纷纷推出自己研发的基于NB-IoT标准的物联网芯片，进一步加快了NB-IoT的商业化步伐。

R&S®CMW宽带无线测试平台

长久以来，罗德与施瓦茨公司一直是无线通信市场开发测试与测量解决方案的先锋。作为用于先进的LTE-A技术研发的测试与测量设备的市场领导者，罗德与施瓦茨公司提供了一个通用、灵活的测试平台。

R&S®CMW平台一直在持续不断的改进，并且在与芯片及无线设备制造商的长期合作中积累了丰富的经验。R&S®CMW平台以一台紧凑型测试仪提供最新的LTE增强技术和所有传统技术，非常适用于智能手机、平板电脑等移动设备以及基站的测试。它还是用于测试汽车制造、医疗保健、智能家居和其他物联网领域中联网产品的多种要求的优秀平台。

平台型号R&S®CMW500宽带无线通信测试仪



R&S®CMW500宽带无线通信测试仪是用于射频集成与协议开发的通用测试平台。产品有R&S®CMW500 callbox与R&S®CMW500协议测试仪。R&S®CMW500包含完全集成的端到端数据解决方案，可实现全面的IP吞吐量和质量测量。借助于内部衰落模拟器，实现真实传输条件下的测试变得非常简单。R&S®CMW500设备集三大基本功能于一身，即：RF信号发生器、RF分析器和信令功能（网络仿真）。因此，

R&S®CMW500可用于从产品研发、生产到服务的所有阶段。这种解决方案的可支持技术范围最为广泛。极高的可扩展性、测试速度和测量精度，使测试成本降至最低程度。



R&S®CMW宽带无线通信测试仪可为所有现代蜂窝和非蜂窝标准提供通用的高效测试解决方案。R&S®CMW是全球使用最广泛的研发、生产和服务的测试与测量平台。它符合先进无线通信测试仪的所有要求。R&S®CMW还可模拟真实条件下的网络运行，以便用于协议和射频测试。

模块化的 R&S®CMW平台覆盖产品周期所有阶段的所有测试要求。仅需一次基础投资，便可测试整个产品周期内的无线设备，从研发、认证及网络优化到生产和服务。可以轻松修改现有配置，从而完成其它测试与测量任务。R&S®CMW以一台仪器结合射频和协议测试。R&S®CMW可执行符合OSI层级模型的射频测试、E2E测量和 OTT分析。

R&S®CMW是测试电池耗电量和OTA/OTT等用户体验和应用的基础。结合复杂IP分析，同时可以模拟各种无线技术(包括2G、3G和LTE)，让这些测试成为可能。可在理想和非常理想条件下模拟这些技术，进而测试无线设备。利用附加的IP损伤或内部衰落模拟非理想运行。



在开发无线设备时，必须在真实网络条件下测试通信接口。R&S®CMW可以模拟全部所需技术的基站，进而测试这些设备。

每一种待测技术的无线接入网和核心网都是完备的。R&S®CMW 可处理从物理层到应用本身的所有协议层。信令消息在运行时动态创建，并能按照需求适应DUT的要求。

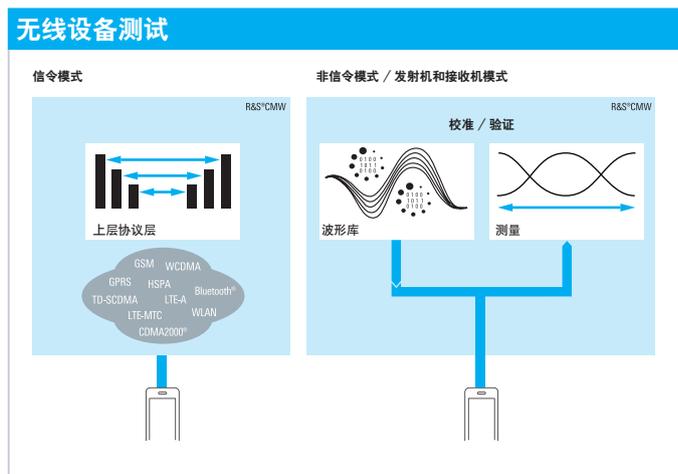
R&S®CMW可配置到最小细节，让用户能够定义场景并得到可重现的结果。射频参数和信令协议本身都能进行是否符合规范要求的测试。可同时运行多个通信标准，从而模拟切换场景和干扰情况。

| R&S®CMW 平台对无线技术的使用 | | | | | | |
|---------------------------------------|-------|-------|--------------|-------------------|---------|------|
| 技术 | 射频发生器 | 射频分析仪 | 网络模拟 | 协议测试 | 端到端应用测试 | 衰落支持 |
| 蜂窝技术 | | | | | | |
| LTE-A | • | • | • | • | • | • |
| WCDMA/HSPA+ | • | • | • | • | • | • |
| GSM/GPRS/EGPRS | • | • | • | • | • | • |
| CDMA2000® 1xRTT, CDMA2000® 1xEV-DO | • | • | • | • (与LTE无线接入技术的切换) | • | • |
| TD-SCDMA | • | • | • | • (一致性测试) | • | • |
| 非蜂窝技术 | | | | | | |
| WLAN IEEE 802.11 a/b/g/n | • | • | • | • (业务分流测试用例) | • | |
| WLAN IEEE 802.11 p/ac | • | • | | | | |
| Bluetooth® (BR/EDR/LE) | • | • | • (LE直接测试模式) | | | |
| IEEE 802.15.4 (ZigBee) | • | • | | | | |
| 广播技术 | | | | | | |
| GNSS (GPS, Glonass, Beidou) | • | | | | | |
| DVB-T | • | | | | | |
| T-DMB | • | | | | | |
| CMMB | • | | | | | |

不断发展的物联网市场需要测试和分析蜂窝和非蜂窝标准。挑战在于如何通过仅需一次连接的简单设置提供这种能力。

R&S®CMW平台提供蜂窝和非蜂窝网络模拟功能的独有组合。还可用于测试技术内或技术间的切换。独立的LTE和WLAN信令功能可实现对LTE WLAN业务分流的详细分析。简单的设置满足从协议开发到功能性测试的所有阶段。

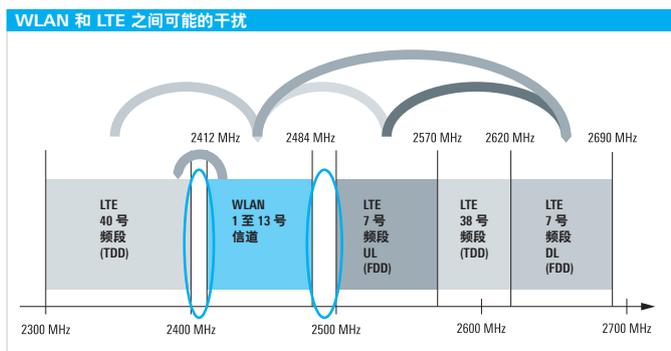
同一台移动设备中支持的标准数量的增加可能会导致传输质量变差。R&S®CMW也可解决该问题。设备内共存测试可分析标准之间的互相干扰和灵敏度降低问题。



现代通信设备体型小巧，却能支持大量标准，可能会因为占用相同或邻近频段或者由于谐波而造成干扰。确保符合标准的运行以及最小的相互干扰至关重要。

现代通信设备含有多个射频系统，例如用于LTE-A、3G、CDMA2000®、2G的蜂窝多频段天线以及WLAN、Bluetooth®和各种GNSS系统等非蜂窝技术。设备内共存的测量决定灵敏度降低程度，即在有和没有强干扰信号情况下RX灵敏度的降低。对于标准灵敏度测试，接收机错误率测量已被采用为评估标准。例如，WLAN的数据包错误率(PER)测量。

R&S®CMW非常适用于共存测量。它可为蜂窝和非蜂窝技术提供信令功能。它可以并行运行两种不同的无线系统，并定义相对RX灵敏度测量。结合屏蔽箱(例如R&S®TS7124射频屏蔽箱、R&S®CMW-Z10射频屏蔽箱或R&S®DST200射频诊断箱)，可在实验室内实现高度可重复性测量。R&S®CMWrun自动化测试序列工具可用于自动测量和生成测试报告。测试结果可用于确定优化开发和集成的特定、有效的测试项目。例如，改善天线系统的去耦合、有效降低干扰的信噪比以及优化操作模式。



5G测试平台

5G是3GPP R15及R16之后的移动通信标准，是全新的无线接入和核心网。但是，5G网络将和2G/3G/4G以及4G+ (LTE-A, 及LTE-A Pro) 长期共存协调工作，尤其是在5G网络部署开始的很长一个阶段内更是这样。未来的5G终端必然也是集成了2G/3G/4G和5G的终端，从测试来看，5G终端一定要测试所有这些技术标准以及共存和相互的融合协调工作。

为了实现增强移动宽带eMBB的5G愿景，通常会采用几项主要技术来提高频谱的利用效率和增加数据传输速率。第一项5G公认的技术是Massive MIMO或大规模有源阵列天线用来提高频谱的使用效率增加用户容量和小区边缘覆盖；第二项是毫米波宽带技术，利用毫米波的宽频谱资源提高5G的传输速率；第三项技术是要能够实现各种技术的聚合（例如采用

非授权频段) 传输来提高数据传输速率。为了实现5G的海量物联网mMTC场景以及高可靠低时延uRLLC场景，5G需要有物理层新波形技术以及新编码技术，在同一5G灵活新空口下，实现eMBB, mMTC和uRLLC。这些新的5G技术的采用给测试带来新的挑战。

5G将要采用的Massive MIMO或大规模有源阵列天线技术，各种系统性的技术指标只能通过OTA (Over The Air) 测试方式来测试，而无法通过传统的连线方式进行测试。在天线几何尺寸和波长所决定的远场条件下的OTA测试有时需要很大的微波暗室成本非常高，寻求一种相对简便而且可靠的替代性OTA测试方法是业界面临的共同挑战。

5G的Massive MIMO天线是由上百只以上的天线及收发单元组成，每个射频收发单元的射频幅相特性等指标的一致性必须得到校准才能达到设计的系统指标，测试设备必须能够快速地完成这些校准测试，需要多端口的测试设备。

5G将要采用的毫米波宽带技术，在60 GHz以上频段需要2 GHz以上的带宽，测试用的信号源和信号分析仪必须具有2 GHz高带宽，高功率输出，高灵敏度和高线性动态范围，覆盖毫米波频段最高至86 GHz。必须能够灵活配置产生和分析各种5G候选波形的信号。

在5G海量物联网测试方面，由于物联网基站网络通常是和传统2G/3G/4G协同工作，网络的共存需要测试的保证，物联网终端同样需要和移动终端一样的一致性测试，才能保证海量的物联网装置同时和谐正常工作。同时，物联网终端装置要求极低的电池耗电，如何仿真各种真实的应用场景下对终端装置耗电进行测试非常重要。

利用上面所述的测试平台和仪表，无论是宽带信号测试，信道测试，Massive MIMO,新空口，5G元器件，及E2E等应用的测试，R&S公司可以轻松的搭建出满足5G测试需求的专用解决方案。



NB-IoT测试平台

目前市面上已经有许多基于EC-GSM的物联网应用（电表，摩拜单车等等），为了兼容现有的物联网应用，许多行业用户提出双模（EC-GSM/NB-IoT）和多模（EC-GSM/NB-IoT/eMTC）芯片/终端的要求。另一方面移动运营商也会逐步扩大和升级基站设备，支持多种蜂窝物联网技术覆盖，为更多的行业用户提供更多样化的选择和服务。因此基于蜂窝物联网技术的双模、多模芯片/终端越来越多，而这些设备本身以及多模共存状态下的功能和性能都需要完备的测试解决方案来验证。

基于R&S®SMW200A矢量信号发生器和R&S®FSW信号与频谱分析仪可以很容易的产生和分析NB-IoT信号。SMW200A和FSW的灵活的可扩展性，使得他们对于新通信技术的支持游刃有余。用户只需要升级部分硬件和软件便可轻松面对新的通信技术带来的测试挑战。

SMW200A内置的SMW-K115选件产生符合3GPP Rel-13的标准NB-IoT信号。

FSW内置的FSW-K106对NB-IoT信号进行分析与测量。也可以选择使用软件解析工具VSE-K106软件对NB-IoT信号进行分析和测量。

R&S®SMW-K115主要特点

- 支持eMTC和NB-IoT的上行链路配置，以及NB-IoT的下行链路配置
- 支持NB-IoT独立模式配置和与LTE混合模式的配置
- 支持NB-IoT频段内和保护频段操作模式
- 直观的用户界面表现在时间计划的图形显示上
- 支持范围增强CE模式A和B和CE级别0、1和2
- 支持新的窄带信道和同步信号(NPSS、NSSS和来源于NCell ID的下行参考信号)
- 基于下行控制指示的NPDCCH和NPDSCH的配置
- NPDCCH, NPDSCH和NPBCH信道的信道编码和加扰(包括SIB类型1)
- 支持NPUSCH信道的信道编码和加扰
- NPRACH信道的配置
- 支持所有的特定调制类型

R&S®VSE-K106选件覆盖了3GPP所定义的NB-IoT的基站和用户设备的调制测试。



R&S®CMW500是NB-IoT一致性测试的最佳选择，一台仪表就可以支持协议、射频以及RRM、USIM等一致性认证测试。完成整个一致性认证测试。它由很好的继承性和兼容性，支持所有的2G、3G、4G无线通信标准以及NB-IoT和eMTC蜂窝物联网通信技术，为用户提供最大限度的选择。



使用R&S®CMW 500平台可以快速的一键测量多个NB-IoT和eMTC发射机测试项目。

NB-IoT多域测量

- 每个子载波上的UE输出功率
- 每个时隙UE最大输出功率
- 开/关时间模板
- 调制准确度 (EVM, 幅度误差, 相位误差)
- EVM
- I/Q星座图
- 带外杂散 (频谱辐射模板和ACLR)

为了测试接收机灵敏度，将具有特定调制和传输等级的数据包发送到被测设备以确定数据包的误码率 (PER)。在信令模式下，当被测设备正确解码数据包时，被测设备向测试仪返回肯定确认 (ACK)。在非信令模式下，需要用软件工具读出被测设备内部寄存器中的 ACK 数量。

R&S®CMW500拥有强大的功能，不仅能够完成GCF/PTCRB认证通过的测试用例，而且开发了运营商定制的测试用例。比如中国移动应给的NB-IoT的NS-IOT测试用例（包括协议、射频和性能部分）。

推荐仪器配置列表

通用射频微波电路测试平台

| 仪器 | 指标 | 特点 | 备注 |
|---|--|--|---|
| 矢量网络分析仪R&S®ZVA  | <ul style="list-style-type: none"> ■ 10 MHz-67 GHz ■ 2和4 端口 ■ 内置2源或4源 ■ 动态范围 140dB ■ IF带宽 1/5/30MHz ■ 脉冲包络测量（带宽30 MHz、分辨率 12.5 ns） | 用于完成富有挑战性研发任务的高端仪器，在多个方面建立了新的标准，适用于有源和变频等器件的测量。 <ul style="list-style-type: none"> ■ 并行测量 ■ 对混频器和变频器实现包括相位和群延时在内的任意变频测量 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 可用于太赫兹测试和在片测试 ■ 可用于5G测试 |
| 信号与频谱分析仪R&S®FSW  | <ul style="list-style-type: none"> ■ 2 Hz - 85 GHz ■ -137 dBc/Hz的相位噪声 ■ 高达5000 MHz的信号分析带宽 ■ 高达512 MHz的实时分析带宽 ■ 高动态范围>100 dBc ■ 在8 GHz范围内测量不确定度小于 0.4 dB | 高端的信号与频谱分析仪，具有极低的相位噪声，极宽分析带宽以及人性化的操作界面。 <ul style="list-style-type: none"> ■ 12.1 WXGA 触摸屏 ■ 400 M采样点存储 ■ 多种结果同时显示 ■ 快速识别和分析杂散 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 可用于太赫兹测试 ■ 可用于无线测试 ■ 可用于雷达测试 ■ 可用于5G测试 ■ 可用于IoT测试 |
| 相位噪声和VCO分析仪R&S®FSWP  | <ul style="list-style-type: none"> ■ 1 MHz – 8/26.5/50 GHz ■ 相位噪声 -172 dBc (1 Hz) at 10 kHz@1 GHz ■ 80 MHz分析带宽 | 将相位噪声分析仪和高性能频谱分析仪结合在一起。 <ul style="list-style-type: none"> ■ 调幅噪声和相位噪声同步测量 ■ 脉冲源相位噪声一键测量 ■ 内部源适用于测量附加相位噪声，包括脉冲信号的相位噪声 ■ 一键测试，高速测量 ■ 触摸屏 | |
| 数字示波器R&S®RTO  | <ul style="list-style-type: none"> ■ 600 MHz/2或4通道 ■ 1 GHz/2或4通道 ■ 2 GHz/2或4通道 ■ 4 GHz/4通道 ■ 6 GHz/4通道 ■ 采样率10 Gs/s至20 Gs/s ■ 存储长度20M/80M (100M/400M) | <ul style="list-style-type: none"> ■ 每秒一百万次波形捕获率 ■ 测量和分析功能采用了硬件加速技术 ■ 准实时频谱分析 ■ 令人信服的测量精度 ■ I²C,SPI,UART,CAN/LIN,I²S总线触发与解码 ■ 首创性的用户界面，操作直观、流畅 | |

| 仪器 | 指标 | 特点 | 备注 |
|--|---|---|---|
| 功率计R&S®NRP | | | |
|  | <ul style="list-style-type: none"> ■ NRP-Z58采用热耦功率探头，最高工作频率高达110 GHz ■ 功率测量范围 -35 dBm - +20 dBm | 测量精度高，易于使用。 <ul style="list-style-type: none"> ■ 在高测量速度下具有极高精度 ■ 可从R&S®NRP2主机、信号源、频谱分析仪或网络分析仪来操作 ■ 或通过USB与PC直接连接后独立使用 ■ 可通过LAN口测试 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 可用于太赫兹或在片测试 ■ 可用于雷达测试 ■ 可用于5G测试 ■ 可用于IoT测试 |
| 矢量信号发生器R&S®SMW200A | | | |
|  | <ul style="list-style-type: none"> ■ 第一通道 100 kHz-3/6/12.75/20/31.8/40 GHz ■ 第二通道100 kHz-3/6/12.75/20 GHz ■ 相噪噪声 -139 dBc (1Hz) @ 1GHz, 20 kHz offset ■ 输出电平-145到+18 dBm ■ 高达2 GHz I/Q调制带宽 | 信号质量高，灵活性能好，可作为产生复杂调制信号的理想解决方案。 <ul style="list-style-type: none"> ■ 多达8个基带信号源 ■ 4衰落模块，16逻辑衰落器 ■ 支持所有主要MIMO模式 ■ 带有通用编码器，可实时生成信号 ■ 支持所有主流的调制模式 ■ 触摸屏 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 可用于太赫兹测试 ■ 可用于无线测试 ■ 可用于雷达测试 ■ 可用于5G测试 ■ 可用于IoT测试 |

射频微波电路高端扩展测试平台

| 仪器 | 指标 | 特点 | 备注 |
|--|---|---|--|
| 太赫兹测试扩展平台 | | | |
| 变频器R&S®ZVA-ZXX | | | |
|  | <ul style="list-style-type: none"> ■ ZVA-Z110 (110 GHz) | 配合ZVA 网络分析仪使用，可以方便地实现高达500 GHz的矢量网络分析。 <ul style="list-style-type: none"> ■ 输出功率可调 ■ 可支持多达6个变频器的多端口测量 ■ 脉冲测量 | THz器件测试，基于ZVA67矢网络分析仪，频率扩展至10 MHz-110 GHz，同轴连接 |
| 微波信号发生器R&S®SMF100A | | | |
|  | <ul style="list-style-type: none"> ■ 100 kHz-43.5 GHz ■ 相噪 <-115 dBc (1Hz) @ 10 GHz, 20 kHz offset ■ 输出电平 高达 +24 dBm@10 GHz | 在信号质量、速度和灵活性等方面建立了新的标准。 <ul style="list-style-type: none"> ■ 突出脉冲信号性能 ■ 生成连续波和模拟调制信号 ■ 移动式大容量存储介质 | |

| 仪器 | 指标 | 特点 | 备注 |
|---|---|--|------------------------------|
| 太赫兹测试扩展平台 | | | |
| 倍频器R&S®SMZ | | | |
|  | 输出频率范围 <ul style="list-style-type: none"> ■ 50 GHz-75 GHz ■ 60 GHz-90 GHz ■ 75 GHz-110 GHz ■ 110 GHz-170 GHz ■ 输出电平 +5 dBm | 与微波信号源配合使用，可在50 GHz至170 GHz范围内提供精确可调输出电平。 <ul style="list-style-type: none"> ■ 高信号质量 ■ 宽动态范围 ■ 集成式机械或者电控衰减器 | THz信号产生，可根据需要选配基于SMW200A或SMF |
| 谐波混频器 | | | |
|  | 频率范围 <ul style="list-style-type: none"> ■ 75 GHz-110 GHz | 外部谐波混频器，和FSW连接使用，扩展频率到110 GHz <ul style="list-style-type: none"> ■ Auto ID功能 ■ 直接连接，易于使用 | 基于FSW85信号与频谱分析仪，直接扩展到110 GHz |

| 仪器 | 指标 | 特点 | 备注 |
|----------------------------|---|--|-----------------------------------|
| 芯片在片测试扩展平台 | | | |
| TS150-THZ探针台系统 | | | |
| | Wafer直径150mm 10个DC或4个RF 微定位可达25x25mm XY移动5 μm精确度 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 高阶毫米波MP80微定位器 ■ 高倍率及工作距离的MPI SZ10或MZ12光学显微镜 ■ 变频器和待测物之间的距离短 ■ 最短信号传输路径 ■ 最佳测量方向性及精确度 | 和ZVA67配合使用，进行在片测试，搭配NRP-Z58进行功率测试 |
| MPI QAlibria™免费校正软件 | | | |
| | | <ul style="list-style-type: none"> ■ 直接安装在ZVA中 ■ 精确且可重复的S参数测量 ■ 快速测量集肤效应和介电损耗， ■ 精确获取高阶谐波频率等数据 | 和ZVA67配合使用，进行在片测试，搭配NRP-Z58进行功率测试 |

| 仪器 | 指标 | 特点 | 备注 |
|--|--|--|---------------------------|
| 先进有源谐波负载牵引测试平台 | | | |
| Tuner阻抗调谐器 | | | |
|  | 输入端基波Tuner ■ ICCMT系列 输出端谐波Tuner ■ MPT系列 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 频率可以覆盖到60 GHz ■ 集成谐波阻抗调谐单元 ■ 支持预匹配技术 ■ 测试速度快 ■ 测试精度高 ■ 维护成本低 | 和ZVA67配合使用，进行放大器的各种负载牵引测试 |
| FDCS负载迁移设计套件 | | | |
| | | <ul style="list-style-type: none"> ■ 支持夹具的TRL校准 ■ 时域动态负载线测量 ■ 脉冲IV特性测量 ■ 谐波负载牵引测量 ■ 有源负载牵引测量等 ■ 数据可以以图形化二维或三维显示 ■ 可以转换成各种流行仿真器所需要的数据格式(如ADS、AWR等) | 和ZVA67配合使用，进行放大器的各种负载牵引测试 |

无线通信和IoT芯片扩展测试平台

| 仪器 | 指标 | 特点 | 备注 |
|--|--|--|--|
| R&S®CMW500 | | | |
|  | <ul style="list-style-type: none"> ■ 70 MHz-6 GHz | <ul style="list-style-type: none"> ■ 一体化综合测试平台 ■ 用于射频集成与协议开发的通用测试平台 ■ 集三大基本功能于一身：RF信号发生器、RF分析器和信令功能 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 适用于所有无线测试 ■ 包括5G测试 ■ 包括IoT测试 |
| 各种测试附件 | | | |

智能网联汽车 测试大平台

这是一个智能化的时代，随着机械技术、传感器技术、控制技术、通信技术的不断发展和融合，未来的汽车也需要更加智能化、网络化。而随着汽车电子在汽车上的应用越来越多，对电子设备的测试要求也越来越高，尤其汽车领域对电子技术和产品的应用更注重安全性、稳定性。高精度、可靠、综合性的测试系统能够为研发人员和生产测试人员带来极大的灵活和便利。

罗德与施瓦茨公司是欧洲最大的测试仪器生产商，为欧洲各大品牌的汽车制造厂、零部件厂提供可靠的测试仪器和完善的解决方案，为客户在研发设计，生产测试各个环节提供最先进的技术和有力的支持。

一 车联网测试平台

随着移动互联网、物联网和无线传感器网络技术的广泛应用，车联网成为实现未来智能交通目标的有效途径之一。通信技术是车联网的关键核心技术，决定着车联网的整体性能。首先介绍了车联网的概念、体系架构和特点优势，接着重点阐述了车联网的通信类别、通信体系、通信标准、路由协议和通信安全技术的发展现状；然后分析了车联网通信技术发展面临的问题，最后根据物联网、移动互联网的发展趋势，对车联网通信技术的进行了详解。本文主要介绍车联网的测试解决方案，涉及智能交通ITS测试、C-V2X测试、车载导航测试、RFID智能识别测试、车内无线连接等测试，并根据用户需求，提供了不同等级的方案，包括：研发、产线和一致性认证方案。

车联网技术背景

目前，汽车市场在全世界快速发展使汽车保有量增加，然而汽车出行在给人们生活带来便利的同时也造成交通事故频发、城市交通拥堵、汽车能源消耗增加和环境污染等诸多问题。现有的车载服务系统在网络结构、服务模式以及技术层次上存在很多的改进空间，无法满足日益增长的客观需求。2010年通用汽车向全世界勾画了基于车联网概念的无交通堵塞、零汽车尾气排放、没有交通事故发生等未来城市交通愿景。

面对这一新兴车联网产业的汽车电子信息技术，特别是世界上的汽车工业强国，正在积极地推进车联网领域的研究与探索。欧盟IST在开展车辆间通信研究CarTalk2000项目已经获得了一些进展；德国较早地取得了车联网领域相关的车载通信系统项目的成功，现在已经开始着手研究NOW(Net-work On Wheels)项目，并取得了一些实质性的进展；日本已完成了车辆间进行通信的协同驾驶系统；美国在车联网的通信协议的研究上也取得了一些突破。与此同时，世界上汽车工业强国的各大汽车制造企业和零部件生产商也投入到了车联网的技术研究与应用之中。

伴随着汽车行驶在线信息采集、CAN总线数据共享传输、车辆远程智能控制以及车与路、车与车、车与城市网络的互连接等先进技术的不断创新，实现强化车辆行驶安全、缓解城市拥堵压力、提高交通效率和降低汽车能源消耗等问题面的解决正在逐步实现。车联网继物联网后，将在世界上形成支撑汽车产业的巨大新兴产业。

车联网介绍

车联网概念

曾经有不少人认为，车联网就是能够在车上连接到网络，获取网络上的信息，其实，这是完全没有意义的，不然的话只需要手机拿到车上不需要“车联网”了。就像物联网一样，“联网”不仅仅是连接到网络，更应该是通过连接到网络，获取“物”“车”在使用中所需要的数据，从而达到使这些工具以一种更适合人们期望的方式运行的效果。所以，在车上刷微博，看视频，那不叫车联网，那是车内上网，或者至少这些与交通安全、交通效率无关的都不是车联网的主体。

车联网就应该是为了满足车辆各个环节中的安全、效率、管理、环保以及娱乐需求，单一网络无法满足复杂应用所带来的通信性能需求，必须将不同的通信手段结合起来组件车联网，也即异构通信网络，例如使用DSRC来进行安全应用，RFID进行管理应用，蜂窝网络进行环保应用等。

车联网的概念涉及范围比较广泛，传统的理解是站在信息感知技术的角度，车联网是指车辆上的电子标签通过RFID等无线射频识别技术，实现对车辆的属性、静态和动态信息进行提取和有效利用，并对车辆运行状态进行有效的监管和提供综合性的服务。



图1 车联网情景

随着物联网的发展、自动驾驶技术的发展及汽车行业的改变，车联网也被重新定义，据车联网产业技术创新战略联盟的定义：车联网是以车内网、车际网和车载移动互联网为基础，按照约定的通信协议和数据交互标准，在车与人、车与道路、车与互联网等之间，进行无线通信和信息交换的大系统网络，通过实现对海量数据的“过滤清洗”，实现对车、人、物、路等状况的实时监控、科学调度和有效管理，进而实现智能化交通管理、智能动态信息服务和车辆智能化控制一体化网络。

车联网体系架构

根据现阶段车联网的技术发展，结构上看，车联网系统可分为三层，如下图所示：



图2 车联网体系架构

感知层（车内网或端）：汽车的智能传感器，负责采集与获取车辆的智能信息，感知行车状态与环境；是具有车内通信、车间通信、车网通信的泛在通信终端；同时让汽车具备IOV寻址和网络可信标识等能力的设备。

网络层（车际网或管）：解决车与车（V2V）、车与路（V2R）、车与网（V2N）、车与人（V2I）等的互联互通，实现车辆自组网及多种异构网络之间的通信与漫游，在功能和性能上保障实时性、可服务性与网络泛在性，同时它是公网与专网的统一体。

应用层（车云网或云）：车联网是一个云架构的车辆运行信息平台，它的生态链包含了ITS、物流、客货运、危特车辆、汽修汽配、汽车租赁、企事业单位车辆管理、汽车制造商、4S店、车管、保险、紧急救援、移动互联网等，是多源海量信息的汇聚，因此需要虚拟化、安全认证、实时交互、海量存储等云计算功能，其应用系统也是围绕车辆的数据汇聚、计算、调度、监控、管理与应用的复合体系。

随着移动互联网、物联网和无线传感器网络技术的广泛应用，车联网日益成为实现未来智能交通及无人驾驶的有效途径之一，是当前全球研究和关注的焦点。通信技术作为车联网的基础，决定着车联网的整体性能，是车联网的关键支撑技术。

V2X技术

V2X，顾名思义就是Vehicle-to-Everything，其希望实现车辆与一切可能影响车辆的实体实现信息交互，目的是减少事故发生，减缓交通拥堵，降低环境污染以及提供其他信息服务。

根据3GPP定义的V2X车联网技术，运用D2D技术以及移动通信技术等，实现面向应用的技术。基于V2X的智能安全辅助驾驶系统，能够实现车辆之间的通信，以及车辆与行人之间的通信。车辆之间利用RFID（射频技术）、传感器、拍照设备等，来获取车辆运行信息，包括位置信息、行车环境信息等，在智能安全辅助驾驶系统架构中实现数据信息分析与处理，进而实时汇报路况，及时发出交通事故警报。

V2X主要包含Vehicle-to-Vehicle (V2V) 车与车，Vehicle-to-Infrastructure (V2I) 车与交通设施，Vehicle-to-Network (V2N) 车与网络以及Vehicle-to-Pedestrian (V2P) 车与行人。

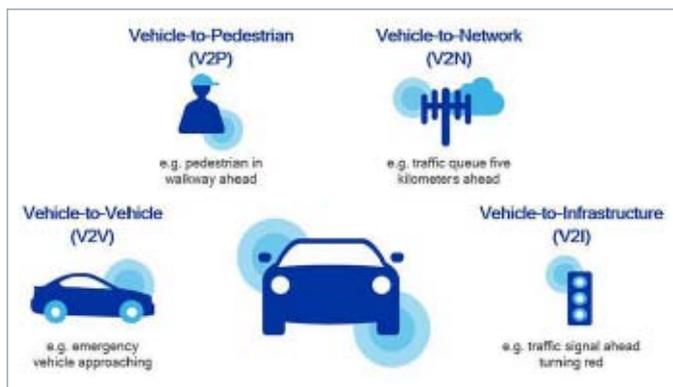


图3 V2X分类图解

车联网中的无线通信技术

汽车电子涉及的无线通信技术比较多，包括：2G、3G、4G及将来的5G通信、WLAN、Bluetooth、GPS/Glonass/Galileo/BeiDou、DSRC/LTE-V、车载雷达等，所占用的频率范围非常广泛，从LF频段（20 kHz）一直到毫米波EHF（79 GHz）频段。

车联网目前还处在不断演进的阶段，各种应用相对独立，从技术的角度而言，现阶段车联网可以建立一种混合式的架构，在这种混合架构中，长距离通信技术，如蜂窝网络2G/3G/4G/5G等，能够为人们提供即时的互联网接入；而短距离通信技术，如DSRC、C-V2X等，则能够为安全系统提供实时响应的保障以及为基于位置的信息提供有效支持；同时可以融合GNSS技术，对车辆进行精确定位，在一定程度上可以满足车联网的基本应用；射频识别RFID技术则可以为车辆提供身份认证等；车内无线连接用于汽车信息服务。

车联网V2X关键的通信技术DSRC和C-V2X

目前，V2X通信技术发展主要是以IEEE 802.11p为代表的DSRC通信技术和以蜂窝为基础的C-V2X通信技术。DSRC发展较早，目前已经非常成熟，不过随着LTE技术的发展，在3GPP的推动下，基于4G网络LTE的车联网通信技术LTE-V2X也开始逐渐发展起来，该技术标准会持续演进至基于未来5G NR的NR-V2X。

DSRC/IEEE 802.11p通信

I DSRC技术推动力

美国交通局USDOT(US Department of Transportation)基于2004 - 2008年交通事故分析得出以下结论：使用V2X系统可以降低450万起碰撞事故（占多车碰撞总数的81%），为此USDOT要求OEM厂商最迟在2019年底及以后生产的汽车要安装DSRC设备，支持V2V和V2I。至今，美国DSRC技术已经经过10余年的广泛测试，技术相对成熟。

讲V2X的历史，就必须首先要提到智能交通系统ITS。1950 - 1980年，美国各州广泛兴建州际公路、高速公路，随之出现了新的问题：城市中心交通拥堵、高速碰撞事故造成众多的人员伤亡，同时又增加汽车油耗，降低空气质量。

到了1986年，来自科研机构、交通局等的专家在讨论未来交通法规时认为，未来的交通系统必须要同时要保证安全、解决拥堵并且保护环境。1990年在德克萨斯州的达拉斯市，针对这个问题的研讨达到高潮，与会者提出IVHS，即智能车辆高速系统的概念，这个概念后来发展成了智能交通系统ITS。

1991年，ITS概念成为联合运输效率法案（Intermodal Surface Transportation Efficiency Act，简称ISTEA）的一部分。此外，ISTEA还出资66亿美元用于未来6年的ITS系统的研究及测试。

1992年，USDOT在ITS的研究中启动了自动高速系统的项目，目的是解放驾驶员的手脚，车辆需要在专门设有磁钉的道路上行驶，这也是历史上第一次实现车辆与高速公路的互联。

在自动高速系统试验之后，1997年USDOT启动智能车辆计划，目的是加快防碰撞系统的部署。在智能车辆计划的基础上，USDOT对改善交通拥堵状况和改进电子通信技术提出新的要求。2003年12月在马德里召开的第十届ITS世界大会上，USDOT宣布在5.9 GHz分配75 MHz频谱进行DSRC研究，同时提出VII项目，项目目标是使V2V和V2I技术在小范围内应用测试。

2006年12月，USDOT与五大汽车厂商联合测试V2V和V2I在防碰撞系统中的作用，并确立新型通信为基础的安全设施，主要包含路边网络RSN和车载设备OBU。

只有当道路上有足够多的车辆支持V2V通讯，V2V的作用才能得到充分体现。为此在2014年8月，NHTSA和USDOT提出FMVSS No.150法案，法案强制要求新生产的轻型汽车(载客和轻卡)支持V2V通讯功能。

I DSRC通信架构

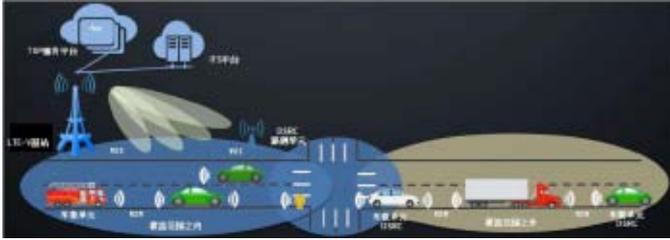


图4 DSRC通信示意图

DSRC系统一般由三部分组成：车载单元 (On-Board Unit, 简称OBU)，路侧单元 (Road-Side Unit, 简称RSU)以及专用短程通信协议。整个通信过程，主要包括车载单元OBU之间的通信 (V2V) 和车载单元OBU与路侧单元RSU及路边基础设施之间的通信 (V2I)。OBU与RSU提供车间与车路间信息的双向传输，RSU再透过光纤或行动网络将交通信息传送至后端平台。由于车间与车路通信应用情境复杂，汽车数量多少、距离与道路气候等都会影响无线网络的通信，通信速度与质量将对路人安全造成极大影响，因此车联网安全应用相关通信网络通常被要求须要具备高移动性与低延迟率，IEEE将安全应用通讯延迟容许范围固定在50 ms内，最多不超过100 ms，允许接收讯息后有足够反应时间。

车载单元实际上就是汽车通信车载终端，主要由通信处理器、射频收发机、GPS接收机/处理器、汽车CAN总线接口、数据存储器、显示屏等组成。主要是接收、存储、定时更新汽车行驶数据(车速、对方车速、相对车速、行驶方向、对方行驶方向、相对方向、车距、刹车等)，向其他车辆或路侧单元发送汽车行驶数据，对行驶状况给出预警显示。

I 路测单元RSU

路侧单元一般是指安装在路口交通设施旁或道路旁边的汽车通信设备，主要由通讯处理器、射频收发机、数据存储器、交换处理器、通信网关(如需接入其他制式的网络)等组成，一般支持较大容量的信息处理和交换，主要用于交通设施与汽车的通信，交换交通信息(包括交通信号、路况信息等)，提示告警等。LTE-V的路侧站还可以通过有线或无线网络与

其他站进行数据交换，以及通过光纤等接入交通管理中心或者TSP服务中心。

I 专用短程通信DSRC

主要采用DSRC/IEEE 802.11p通信方式。

I DSRC通信协议

DSRC由物理层标准IEEE 802.11p又称为WAVE (Wireless Access in Vehicular Environment) 及网络层标准IEEE 1609所构成，在此基础上，美国汽车工程师协会SAE规范V2V与V2I信息的内容与结构，欧洲相关标准由ETSI CT-ITS所规范。IEEE 802.11p由IEEE 802.11标准扩充，DSRC技术产生基于三套标准：

- I 第一个是IEEE 1609，标题为“车载环境无线接入标准系列(WAVE)”，其定义了网络的架构和流程。
- I 第二个是SAE J2735和SAE J2945，它们定义了消息包中携带的信息。该数据将包括来自汽车上的传感器的信息，例如位置，行进方向，速度和刹车信息。
- I 第三个标准是IEEE 802.11p，它定义了汽车相关的“专用短距离通信”(DSRC)的物理标准。

DSRC通信的协议栈如下图所示，从物理层到应用层顺序组织而成。其中应用层分为安全应用和非安全应用，涉及的网络传输协议有所不同。

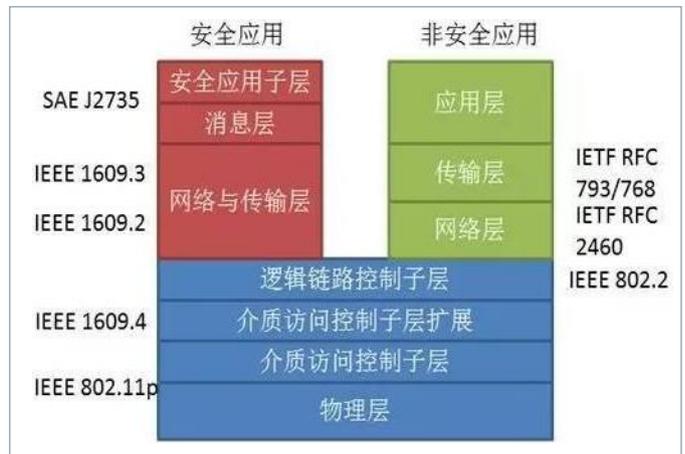


图5 DSRC通信协议栈

DSRC顶层协议栈是基于IEEE 1609标准开发的，V2V信息交互是使用轻量WSMP (WAVE Short Message Protocol) 而不是WiFi使用的TCP/IP协议，TCP/IP协议用于V2I和V2N信息交互。DSRC底层、物理层和无线链路控制是基于IEEE 802.11p。使用IEEE 802.11系列标准的初心是利用WiFi的生态系统，但是WiFi最初设计用于固定通讯设备，后来制定IEEE 802.11p支持移动通讯设备。

由于车辆的快速移动性，车辆与路边的网络基础设施所组成的通信链路也都是临时性的，即只在很短的时间之内存在。所以这个链路必须在极短的时间建立连接，发送数据。而IEEE802.11技术中的那些繁琐的连接认证过程耗时过长，难以使用在车联网。为此，IEEE 1609填补了高层协议的空白，形成一套完整的协议栈。IEEE1609包括4个子协议，其中IEEE1609.1定义了资源管理，将远端的应用层与当前的车辆联系起来；IEEE1609.2为应用层和管理信息提供安全服务；IEEE1609.3是IEEE802.11p的网络层；总体上，IEEE1609.4可处理多信道通信。

I DSRC频段规划

DSRC是连结车辆与车辆 (V2V)、车辆与路侧装置间的RF通用射频通信技术，在车用环境中提供公共安全和中短距离通讯服务。各个国家分配的DSRC使用频段各不相同。1999年，美国联邦通讯委员会 (FCC) 于1999年决定将5.9 GHz (5.850~5.925 GHz) 频段分配给汽车通讯使用。主要目标是使公共安全应用能够挽救生命并改善交通流量。FCC还允许在本领域提供私人服务来降低部署成本，并鼓励快速开发和采用DSRC技术和应用。

美国5.9GHz DSRC的频段规划，以10 MHz频宽为单位，将75MHz频宽划分成七个频道，并由低频至高频分别给予172、174、175、178、180、182与184频道编号。如下图所示，频道178为控制频道 (CCH)，剩余的六个频道为服务频道 (SCH)，其包含两个公共安全专用服务频道 (频道172为车辆与车辆间公共安全专用服务频道，频道184为交叉路口公共安全专用服务频道)、两个中距离公共安全、私用共享服务频道 (频道174与176)，以及两个短距离公共安全/私用共享服务频道 (频道180与182)。

欧洲为DSRC划分了专用频道5855-5925 MHz，其中30 MHz用于主动安全应用；日本则选择将755.5-764.5 MHz作为智能交通系统的专用通信频段。

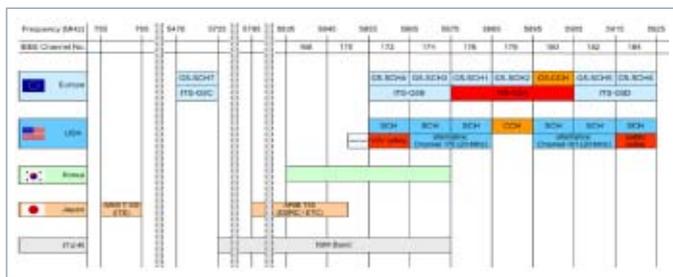


图6 DSRC频段规划

I DSRC物理层

802.11p在760 MHz频段中，支持传输距离小于300米，大致可达180米左右，传输速率低于18 Mbit/s，使用5.9 GHz频段通信时，传输距离最远可达1000米，以频道带宽10 MHz为单位，传输速率最高为27 Mbit/s，允许在车速260 km/h下进行车与车之间以及车与道路设备之间的信息传输。其美国、欧洲和日本在IEEE 802.11p上采用的空口技术，如下图所示：

| | Japan | USA | Europe |
|-----------------------|--|--|---|
| Standard / Committee | ITS-Forum | IEEE802.11p/1609.x | CEN/ETSI EN302 663 |
| Frequency range | 755 – 765 MHz | 5850 – 5925 MHz | 5855 – 5925 MHz |
| No. of Channels | One 10 MHz channel | Seven 10 MHz channels (Two 20 MHz channels formed by combining 10 MHz channels) | Seven 10 MHz channels |
| Modulation | OFDM | | |
| Data rate per channel | 3-18Mbit/s | 3-27Mbit/s | 3-27Mbit/s |
| Output power | 20 dBm (Antenna input) | 23-33 dBm (EIRP) | 23-33 dBm (EIRP) |
| Communication | One direction multicasting service (broadcast without ACK) | One direction multicasting service, One to Multi communication, Simplex communication (broadcast without ACK, multicast, unicast with ACK) | |
| Upper protocol | ARIB STD-T109 | WAVE (IEEE 1609) / TCP/IP | ETSI EN 302 665 (incl. e.g. GeoNetworking) TCP/UDP/IP |

图7 IEEE 802.11p各国空口技术一览

802.11p物理层架构与802.11a大致相同，采用OFDM调制技术，且52个子载波可支持正交振幅调变QAM、相位移键调变PSK等调制技术，同时搭配向前错误校正技术 (Forward Error Correction, FEC)，减少信息重新传输所发生的延迟情况，能够因应在高速移动下信息传递的实时性。

| Parameters | 20 MHz Bandwidth | 10 MHz Bandwidth | 5 MHz Bandwidth |
|-----------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Bit rate (Mbit/s) | 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 | 3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24, 27 | 1.5, 2.25, 3, 4.5, 6, 9, 12, 13.5 |
| Modulation mode | BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM | BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM | BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM |
| Code rate | 1/2, 2/3, 3/4 | 1/2, 2/3, 3/4 | 1/2, 2/3, 3/4 |
| Number of subcarriers | 52 | 52 | 52 |
| Symbol duration | 4 μs | 8 μs | 16 μs |
| Guard time | 0.8 μs | 1.6 μs | 3.2 μs |
| FFT period | 3.2 μs | 6.4 μs | 12.8 μs |
| Preamble duration | 16 μs | 32 μs | 64 μs |
| Subcarrier spacing | 312.5 kHz | 156.25 kHz | 78.125 kHz |

图8 IEEE 802.11p各带宽下的物理层参数

I DSRC衰落场景

车联网通信很关键的一点就是要验证在汽车移动过程当中的通信有效性，汽车在移动过程就会有多普勒平移和衰落。802.11p在标准当中其实定义了五种不同的无线信道模型，针对汽车通信领域的，如下：

- I 衰落场景1：乡村的视距（很空旷的地方可以直接看到对方车辆）
- I 衰落场景2：城市近车距（周围有楼房、有建筑物，同时也能够看到前方车辆）
- I 衰落场景3：十字路口的非视距（十字路口要左拐、右拐，看不到对方的车）
- I 衰落场景4：高速公路上面的视距，高速公路上面体现了车速移动速率非常快
- I 衰落场景5：高速公路上面的非视距，有一些阻挡、遮挡

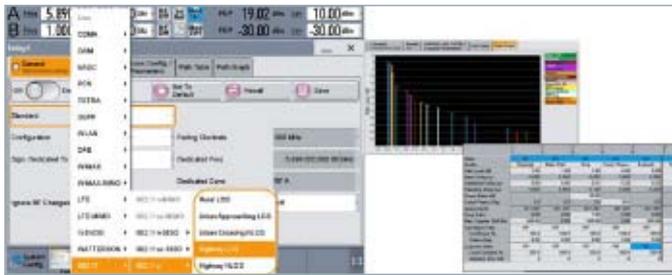


图9 IEEE 802.11p定义的五种不同的衰落场景

802.11p在无线信道模型领域规定了五种不同的信道模型。不同的信道模型，在移动过程当中，通常都是符合瑞利分布的。

C-V2X通信

I C-V2X技术推动力

车联网所采用的技术需支持多场景的业务需求，需要满足行车安全和交通效率。对于车辆主动安全，其通信要求满足如下两个条件：

- 1) 低时延，安全信息的传达必须具有最高优先级；
- 2) 高可靠性，不允许安全数据包的丢失，支持不间断访问，及时切换和无缝连接。

LTE应用于车辆主动安全局限性明显。LTE设计模式和机制是面向人与人（H2H）通信，可支持传统车联网业务，但应用于基于V2X通信的车辆主动安全局限性明显：

- 1) 要保证低时延，车载终端需采用永远在线的通信方式，浪费大量网络资源；
- 2) 堵车等小范围聚集大量节点场景下，并发、频繁的实时数据交互，对空口信道造成压力，导致信道拥堵；
- 3) 车辆节点的高移动性引起切换丢包问题，难保证可靠的通信链路和较低的通信时延；

- 4) 每个车辆节点需频繁发送数据，蜂窝负载压力大

在4G如火如荼的建设潮中，LTE-Advanced Pro（4.5G）席卷而来，峰值速率和吞吐量的技术潜力已得到充分发挥，4.5G的发展重心转向物联网、车联网。LTE-V2X是3GPP针对车联网的第一个专有通信协议，为LTE-A国际标准三大研究方向之一。2015年2月和6月，3GPP SA1#69次会议开始了R14 LTE-V SI“基于LTE的V2X业务需求”的课题研究，标志着3GPP对LTE-V的标准化研究工作正式启动。

大唐基于自主研发的芯片级解决方案，于2016年11月发布了C-V2X车载终端和路侧通信测试设备，计划2017年底发布基于3GPP R14C-V2X的预商用通信模组，商用芯片研发计划已纳入日程：

- I 华为在2016年推出支持C-V2X的车载终端原型机，计划2018年上半年提供C-V2X测试芯片；
- I 2017年9月1日，高通宣布C-V2X商用芯片组于2018年下半年出样；
- I 国际通信企业爱立信、英特尔、诺基亚等也积极推动C-V2X芯片和设备产业化；
- I 奥迪、丰田、上汽、长安、东风等车企纷纷联合通信企业开展C-V2X技术测试。

同时，我国于2015年启动了基于C-V2X技术的车联网频谱研究，2016年11月工业和信息化部正式划分5905-5925MHz用于C-V2X技术试验，并通过北京-保定、重庆、浙江、吉林、湖北、上海、无锡等车联网示范区开展测试和实验验证，试验第一阶段已于2017年底前完成。中国智能交通部门联盟CITS和中国汽车工程师协会CSAE定义40个ITS用例：

- I 2016年多于40个组织开始开发ITS应用层；
- I 2017年9月份发布应用层规范；

根据目前产业发展状况，C-V2X有望于2018年实现规模试点或试商用。

I C-V2X标准演进过程

2014年9月，LG向3GPP提交了LTE在V2X的通信应用的规范草案。随后Ericsson提交了增强LTE D2D接近服务的规范草案。2015年，3GPP的设立LTE for V2X研究专题并纳入Release 14，标志着LTE-V技术标准研究正式启动。C-V2X标准的演进如下图所示：

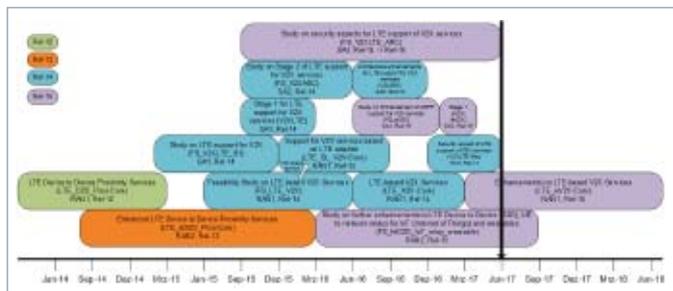


图10 3GPP定义C-V2X标准演进过程

C-V2X是由3GPP (3rd Generation Partnership Project) 定义的基于蜂窝通信的V2X技术，它包含基于LTE网络的LTE-V2X以及未来5G网络的NR-V2X系统，是DSRC技术的有力补充。它借助已存在的LTE网络设施来实现V2V、V2N、V2I、V2P的信息交互，这项技术最吸引人的地方是它能紧跟变革，适应于更复杂的安全应用场景，满足低延迟、高可靠性和满足带宽要求。

LTE-V是我国具有自主知识产权的V2X技术，华为、大唐为3GPP LTE-V标准化研究工作的主导方，是LTE-V标准化过程中SI(Study Item)和WI(Work Item)的主要报告起草人。

技术需求和标准化方面：2015年初，3GPP正式启动基于C-V2X的技术需求和标准化研究，2015年初3GPP需求工作组开展了C-V2X需求研究，3GPP无线技术工作组于2015年7月启动SI立项，于2016年6月完成结项；2016年初3GPP架构工作组启动C-V2X架构研究，于2016年底完成标准化。

I 5GAA及标准演进

2016年9月，电信行业与汽车行业的全球跨行业产业联盟—5G汽车通信技术联盟5GAA (5G Automotive Association) 成立，联盟的使命在于研发、实验和推动智能车联、智慧交通等万物互联所需的通信解决方案和应用，包括相关的标准化推进、商业机会挖掘，以及全球市场的拓展。5GAA发起方包括奥迪、宝马和戴姆勒以及五家电信通讯公司—爱立信、华为、英特尔、诺基亚、高通。目前已经有多家机构加盟该组织，已涵盖主要车企、运营商与设备商成员超过60。各公司将在车联网通信解决方案的开发、测试、促进销售方面展开合作，并支持标准化，加快商用化和向全球市场推广。

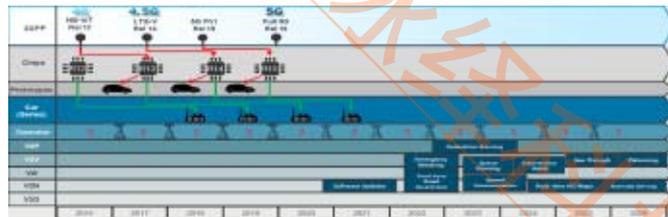


图11 5GAA定义5G V2X标准演进过程

I LTE-V2X通信原理

D2D是基于蜂窝网络的端到端通信技术，距离较近的终端可不经基站中转而直接通信，D2D设备的接入认证、频带资源分配调度、通信时间和功率等则由基站进行控制。D2D通信中，每个终端都是一个网络节点，本质是一种自组网 (Ad Hoc)，具有低时延、邻近发现和支持高速移动等特性，应用于车联网车辆安全领域有先天优势。

车辆向基站提出D2D通信请求，基站接收后传输至MME，MME进行身份认证后，建立通信链路并分配传输IP地址，将用户的通信方式切换到D2D，实现信息共享、发现、广播、交换。在非基站覆盖场景下，亦可进行D2D通信，达到暂时的安全保护，但支持的车辆容量相对较小，效率不如基站覆盖场景下高。

因此，3GPP在2016年6月发布的LTE-V架构规范 (TR 23.785)中，给出了LTE-V2X的通信架构。在V2V、V2I、V2P之间将支持点对点、点对多点的短距离设备直接通信的增强PC5接口；同时V2X的终端支持移动通信网络空中Uu接口，满足广域通信需求。

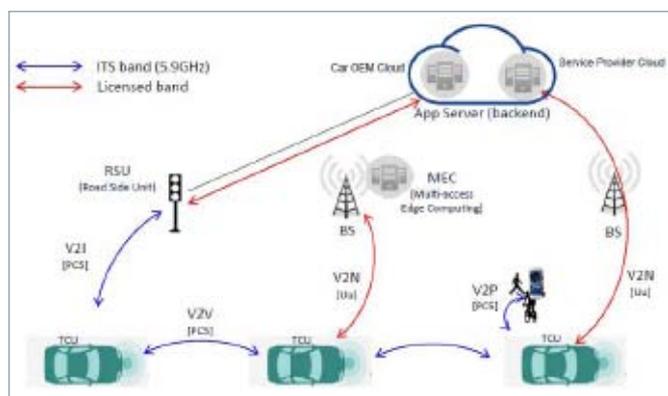


图12 LTE-V2X通信网络架构

LTE-V2X一般由三部分组成：车载单元OBU、路测单元RSU、行人、基站eNB、云服务器等。

LTE-V2X针对车联网应用场景，定义了两种通信方式：集中式 (LTE-V-Cell) 和分布式 (LTE-V-Direct)。其中，LTE-V-Cell也称广域蜂窝式，LTE-V-Direct也称短程直通式，分别对应3GPP标准中的基于Uu接口和PC5接口中的网络架构。3GPP定义了三种LTE-V2X工作场景：

■ 应用场景1：仅PC5接口通信

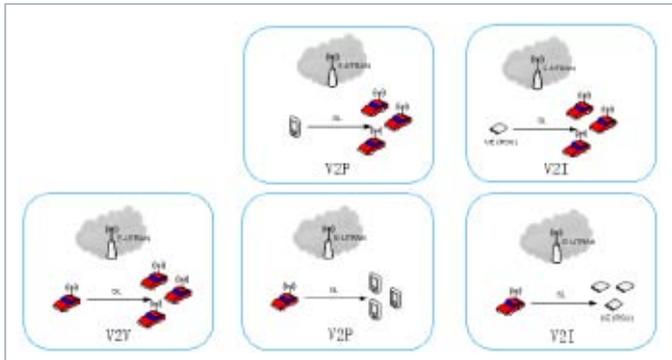


图13 LTE-V2X通信应用场景1-仅PC5接口

可独立于蜂窝网络，引入LTE D2D通信方式，实现V2V、V2I低时延、高可靠的直接通信，满足行车安全需求。PC5接口定义了车辆之间的直接通信方式，其信道、参考信号和资源处理将会与以往工作模式有所不同。在无网络部署的区域通过PC5接口提供车联网道路服务，满足行车安全需求。在有蜂窝网络覆盖的场景下，数据传输可以在Uu接口和PC5接口之间进行灵活的无缝切换。PC5接口在3GPP R12版本上进行了多方面的增强，支持车辆之间的车辆动态信息（例如位置、速度、行驶方向等）的快速交换和高效的无线资源分配机制。

2015年12月，3GPP发布LTE-V的正式需求规范（TR 22.185），确定的LTE-V2V（部分适用于V2I）具体需求指标为：

- 1) 最大时延在100 ms 以内，面向V2V防撞场景为20 ms；
- 2) 典型覆盖范围：4 s响应距离以内；
- 3) 典型数据包大小50-400字节，最大数据包大小1200字节以内；
- 4) 最大发送频率为10 Hz，即每秒十次；
- 5) 最大支持相对车速为250 km/h。

■ 应用场景2：仅Uu接口

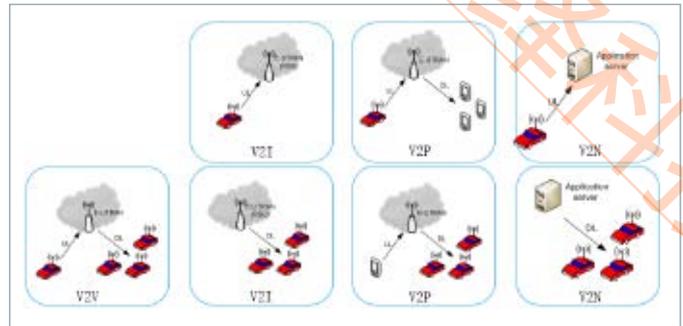


图14 LTE-V2X通信应用场景2-仅Uu接口

需要基站作为控制中心，车辆与基础设施、其他车辆之间需要通过将数据在基站进行中转来实现通信，支持大带宽、大覆盖通信，满足Telematics应用需求。LTE-V2X的Uu接口在LTE的Uu接口基础上进行了针对性的增强，例如优化了LTE广播多播技术来有效支持车联网这种广播范围小且区域灵活可变的业务，对控制信道进行裁剪以便进一步降低延迟。其需要达到的性能指标如下：

LTE峰值速率上行50 Mbps，下行100 Mbps，控制面时延≤100 ms，支持车速120-350 km/h，覆盖范围几百米至1km。相比LTE，LTE-V-Cell峰值速率大幅提升，时延更短，支持更高的移动性。LTE-V-Cell传输带宽最高可扩展至100 MHz，峰值速率上行500 Mbps，下行1 Gbps，时延用户面时延≤10ms，控制面时延≤50 ms，支持车速500 km/h，覆盖范围与LTE类似。

■ 应用场景3：同时支持PC5接口和Uu接口

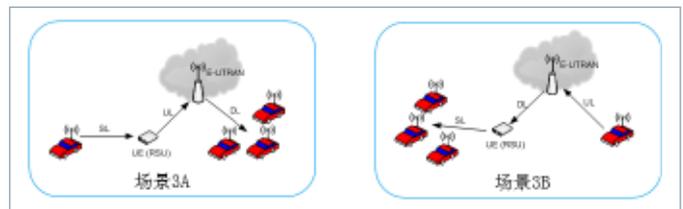


图15 LTE-V2X通信应用场景3-同时支持PC5接口和Uu接口

I LTE-V2X通信频段

(1) 单载波场景

3GPP TR 36.785定义了LTE-V2X的通信频段PC5接口协议，仅用于V2V通信，主要采用E-UTRA 47专用载波频段，信道带宽有10 MHz和20 MHz两种情况。如：

| E-UTRA V2X band /V2X channel bandwidth | | | | | | |
|--|-----------------------|----------------------------|-------|----------------------------|--------|--------|
| E-UTRA V2X Band | 1.4 MHz | 3 MHz | 5 MHz | 10 MHz | 15 MHz | 20 MHz |
| 47 | | | | Yes | | Yes |
| E-UTRA V2X Band | E-UTRA Operating Band | V2X UE transmit | | V2X UE receive | | |
| | | $F_{UL,low} - F_{UL,high}$ | | $F_{DL,low} - F_{DL,high}$ | | |
| 47 | 47 | 5855 MHz - 5925 MHz | | 5855 MHz - 5925 MHz | | |

Note1: The ITS spectrum is used for V2X service

图16 LTE-V2X通信单载波工作频段

(2) 多载波带间共存场景

根据规范，LTE-V2X的多载波带间共存有E-UTRA 47/3/7/8/39/41总共6个频段，如下：

| E-UTRA Operating Band | V2X Operating Band | V2X UE transmit | | V2X UE receive | | Duplex Mode | Interface |
|-----------------------|--------------------|-----------------|---------------|----------------|---------------|-------------|-----------|
| | | $F_{UL,low}$ | $F_{UL,high}$ | $F_{DL,low}$ | $F_{DL,high}$ | | |
| 47 | 47 | 5855 MHz | 5925 MHz | 5855 MHz | 5925 MHz | TDD | PC5 |
| 3 | 3 | 1710 MHz | 1785 MHz | 1805 MHz | 1880 MHz | FDD | Uu |
| 7 | 7 | 2500 MHz | 2570 MHz | 2620 MHz | 2690 MHz | FDD | Uu |
| 8 | 8 | 890 MHz | 915 MHz | 925 MHz | 960 MHz | FDD | Uu |
| 39 | 39 | 1880 MHz | 1920 MHz | 1880 MHz | 1920 MHz | TDD | Uu |
| 41 | 41 | 2496 MHz | 2690 MHz | 2496 MHz | 2690 MHz | TDD | Uu |

图17 LTE-V2X通信多载波工作频段

在上述的6个频段中，针对多载波频段共存的应用，都需要和47号频段共存，如下图所示：

| V2X concurrent configuration | Operating Band | Interface | Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit | | Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive | | Duplex Mode |
|------------------------------|----------------|-----------|---|----------------------------|---|----------------------------|-------------|
| | | | $F_{UL,low} - F_{UL,high}$ | $F_{UL,low} - F_{UL,high}$ | $F_{DL,low} - F_{DL,high}$ | $F_{DL,low} - F_{DL,high}$ | |
| V2X_3-47 | 3 | Uu | 1710 MHz - 1785 MHz | 1805 MHz - 1880 MHz | 5855 MHz - 5925 MHz | 5855 MHz - 5925 MHz | FDD |
| | 47 | PC5 | 5855 MHz - 5925 MHz | 5855 MHz - 5925 MHz | 5855 MHz - 5925 MHz | 5855 MHz - 5925 MHz | TDD |
| V2X_7-47 | 7 | Uu | 2500 MHz - 2570 MHz | 2620 MHz - 2690 MHz | 5855 MHz - 5925 MHz | 5855 MHz - 5925 MHz | FDD |
| | 47 | PC5 | 5855 MHz - 5925 MHz | 5855 MHz - 5925 MHz | 5855 MHz - 5925 MHz | 5855 MHz - 5925 MHz | TDD |
| V2X_8-47 | 8 | Uu | 890 MHz - 915 MHz | 925 MHz - 960 MHz | 5855 MHz - 5925 MHz | 5855 MHz - 5925 MHz | FDD |
| | 47 | PC5 | 5855 MHz - 5925 MHz | 5855 MHz - 5925 MHz | 5855 MHz - 5925 MHz | 5855 MHz - 5925 MHz | TDD |
| V2X_39-47 | 39 | Uu | 1880 MHz - 1920 MHz | 1880 MHz - 1920 MHz | 5855 MHz - 5925 MHz | 5855 MHz - 5925 MHz | TDD |
| | 47 | PC5 | 5855 MHz - 5925 MHz | 5855 MHz - 5925 MHz | 5855 MHz - 5925 MHz | 5855 MHz - 5925 MHz | TDD |
| V2X_41-47 | 41 | Uu | 2496 MHz - 2690 MHz | 2496 MHz - 2690 MHz | 5855 MHz - 5925 MHz | 5855 MHz - 5925 MHz | TDD |
| | 47 | PC5 | 5855 MHz - 5925 MHz | 5855 MHz - 5925 MHz | 5855 MHz - 5925 MHz | 5855 MHz - 5925 MHz | TDD |

图18 LTE-V2X通信多载波频段共存配置

I LTE-V2X传输模式

3GPP RAN#73会议上，列举了以下两种用于V2V通信的传输模式。

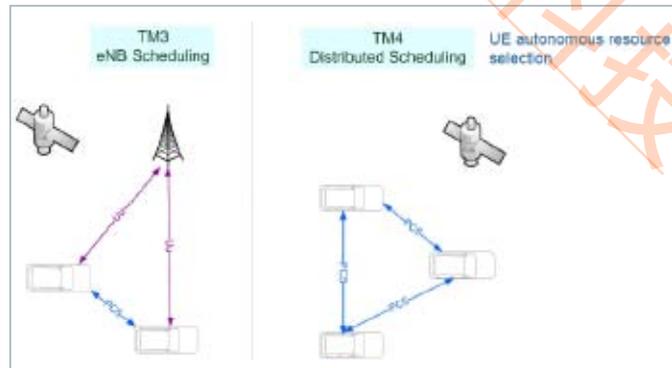


图19 LTE-V2V两种传输模式

I 传输模式TM3

借助基站eNB，通过控制信令接口Uu实现V2V数据的调度和接口管理。在这种情况下，采用动态的方式进行资源的调度，车车间采用PC5接口通信。利用全球导航卫星系统 (GNSS) 进行时间同步。

I 传输模式TM4

V2V数据的调度和接口的管理是基于车车间的分布算法实现。另外，资源的分配依赖地理信息的新机制-Zones。利用全球导航卫星系统 (GNSS) 进行时间同步。

RFID技术

RFID (Radio Frequency Identification) 技术又称电子标签、无线射频识别，是一种无线通信技术，可通过无线电信号识别特定目标并读写相关数据。车作为车联网中的信息节点，要实现与路、站场的信息交互，必须要有一个身份标识，而RFID技术是目前解决该问题最为成熟和经济的手段。在车辆上安装电子标签，可以实现道路、桥梁、停车场自动收费，结合道路上安装的RFID天线可以实现动态交通信息采集，如车辆的流量、流速等。目前国内应用最为广泛的是道桥和站场的自动收费，如广东高速联网收费系统、武汉路桥ETC收费系统，以及在建的武汉智能停车综合管理系统，都是以射频识别技术为基础的。

RFID系统主要由三部分组成，如下图所示：



图20 RFID系统组成

其中，各个部分的功能如下：

- 标签 (Tag)：由IC芯片及一些耦合元件组成，标签含有内置天线，用于和射频天线间进行通信
- 阅读器 (Reader，也叫读写器)：读取电子标签信息的设备。许多阅读器还带有附加的接口RS232或RS485等与外部计算机(上位机 主系统)连接，进行数据交换
- 计算机：进行数据管理

蜂窝通信技术

车联网作为未来智能交通系统和自动驾驶的关键技术，可以全程监控每辆车和每条道路，进而改善交通效率，提高交通安全，提供更加愉悦的乘车体验。车联网的实现需要车辆之间频繁及时可靠的信息交互，因此选定合适的无线通信技术则显得极为重要。

车联网无线通信技术主要依赖两种技术：短距离无线通信和远距离的移动通信。前者主要是RFID和WiFi等短距离通信技术，专门针对车辆运动特性和时延敏感特性制定，在车辆密度适当的环境下可以提供可靠的安全信息传输服务，可以通过无线射频设备感知识别对象目标，并获取数据。而后者主要是2G/3G/4G/5G等蜂窝移动通信技术，目前车联网主要采用4G/5G蜂窝网。随着大数据、云计算、无线通信技术的快速发展，为车联网的具体服务应用提供了坚实的网络支撑。

蜂窝通信在车联网中扮演的作用，主要有如下几种情况：

- V2X信息的传递和共享
- 智能车路协同发展，离不开蜂窝网络通信
- 结合MiFi (Mobile WiFi) 等设备，通过蜂窝网络连接，实现车内WiFi无线上网
- 蜂窝移动通信技术的不断演进，可以满足车联网高密度、高复杂性的应用场景

GNSS卫星导航技术

GNSS定位系统是车载导航定位系统的关键技术，车载GNSS导航定位系统的应用由于车联网市场、无人驾驶的出现，车载导航的需求也在不断增加，正在全球迅速发展。车载GNSS导航定位系统的功能将会越来越完善，精度越来越高，从最初的标准定位SPS需求，发展到现在的高精度定位PPS需求。

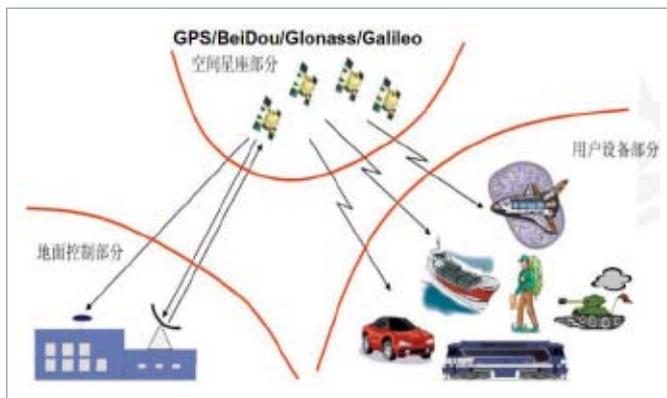


图21 GNSS系统组成

GNSS卫星导航技术在车联网中的应用，除了基本的车载导航应用外，主要提供位置信息、速度信息和时间信息，还会涉及高精度卫星导航定位PPS。其高精度导航定位的主要应用场景如下：

- 位置信息为实现车联网业务的提供重要参考，位置信息越准确，车联网业务可靠性越高。因此，高精度定位PPS是实现车联网业务的关键技术之一
- 对于自动驾驶的实现路径，LiDAR、毫米波雷达、摄像头、高精度地图这几类传感器可互相弥补短板，在可靠性方面实现互补。但这种组合依然有其不可预测的盲区，这时需要高精度卫星导航定位；在自动驾驶系统使用的传感器中，GNSS是所有传感器中唯一能输出绝对时间、位置和速度的传感器，而且价格相对较低

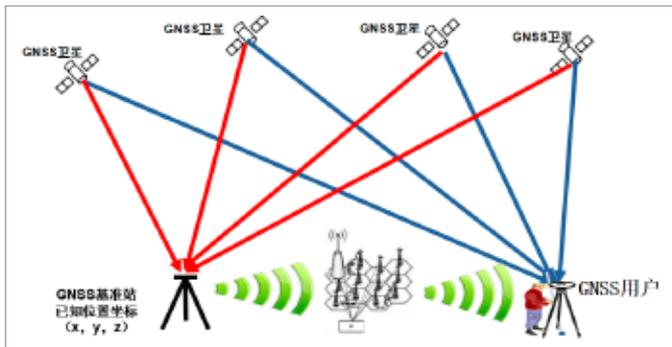


图22 DGNSS/RTK接收机工作原理框图

差分定位接收机DGNSS: Differential GNSS。利用设置在坐标已知的点(基准站)上的GNSS接收机测定GPS测量定位误差,用以提高在一定范围内其它GNSS接收机(流动站)测量定位精度的方法。

载波相位动态实时接收机RTK: Real - Time Kinematic。是实时处理两个测量站载波相位观测量的差分方法,将基准站采集的载波相位发给用户接收机,进行求差解算坐标。这是一种新的常用的GNSS测量方法,以前的静态、快速静态、动态测量都需要事后进行解算才能获得厘米级的精度,而RTK是能够在野外实时得到厘米级定位精度的测量方法,它采用了载波相位动态实时差分方法,是GNSS应用的重大里程碑。本身上是差分定位接收机,只是校正数据通过网络或私有网络实时传输到GNSS用户,而不像普通的差分定位接收机是通过将校正数据拷贝到测量接收机里面,一般RTK接收机具备载波相位测距功能。

汽车中的WLAN无线通信

WLAN无线通信涉及的标准比较多,包括IEEE 802.11a/b/g/n、IEEE 802.11ac/ad等,涉及的频率范围主要有2.4 GHz频段和5GHz频段:

2.4 GHz频段信道划分

共14个信道,相邻信道间隔为5 MHz(特例:信道14是特别针对日本所定义,与信道13的间隔为13 MHz)。信号带宽:22 MHz,整个频段中只有三个互不重叠的物理信道。

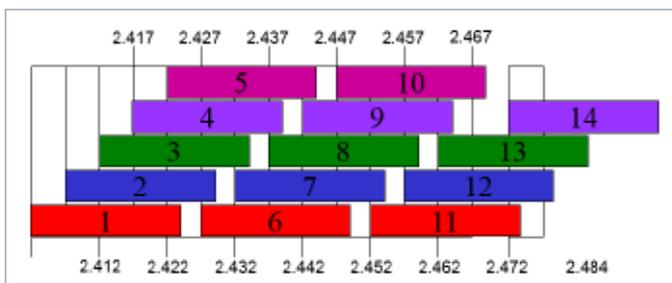


图23 WLAN无线通信之2.4 GHz频段信道划分

2.4 GHz无线技术,是一种短距离无线传输技术,2.4 GHz是全世界公开通用使用的无线频段,在2.4 GHz频段下工作可以获得更大的使用范围和更强的抗干扰能力,目前广泛应用于家用及商用领域。

5 GHz频段信道划分

总共涉及5.15~5.25 GHz、5.25~5.35 GHz、5.725~5.825 GHz三个频段,共300 MHz的射频信道,其中两个相邻WLAN物理信道中心频率相距20 MHz,信道带宽:16.6 MHz。每个工作信道与相邻信道都不重叠,不产生干扰。

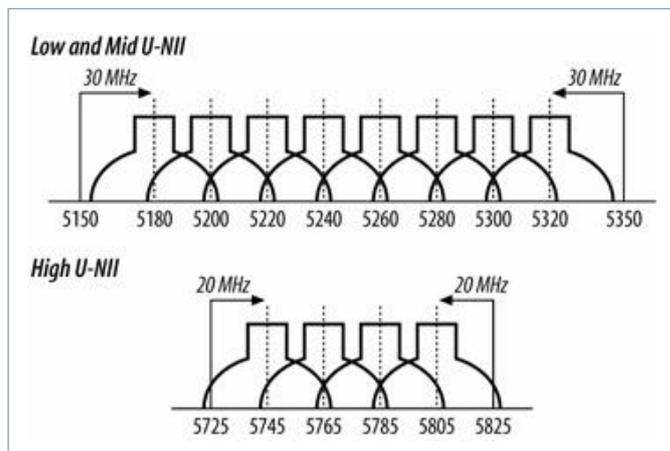


图24 WLAN无线通信之5 GHz频段信道划分

汽车中的Bluetooth无线通信

蓝牙Bluetooth,是一种工作在免费的ISM频段的短距离无线通信技术,在各种设备之间实现灵活、安全、低成本、低功耗的语音和数据通信。它采用自适应跳频技术,可以和多种无线通信共存于ISM频段。

系统工作于2.4 GHz ISM频段:2400-2483.5 MHz,采用40个射频信道,这些射频信道的中心频率按 $2402+k \times 2$ MHz ($k=0, \dots, 39$)规则运行。如下图所示:

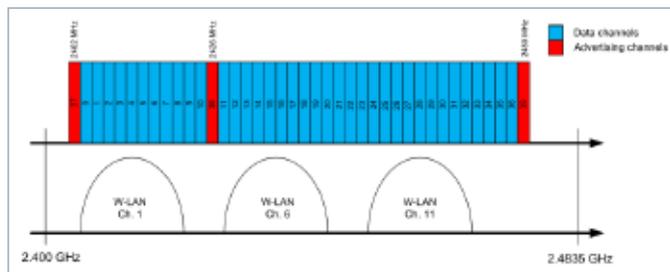


图25 Bluetooth无线通信频段划分

汽车中的NFC近场通信

近场通信NFC (Near Field Communication) 是一种短距低频的无线电技术，在13.56 MHz频率运行于10厘米距离内。其传输速度有106 Kbit/秒、212 Kbit/秒或者424 Kbit/秒三种。这个技术由非接触式射频识别 (RFID) 演变而来，由飞利浦半导体 (现恩智浦半导体)、诺基亚和索尼共同研制开发，其基础是RFID及互连技术。近场通信已通过成为ISO/IEC IS 18092国际标准、EMCA-340标准与ETSI TS 102 190标准。NFC系统包括主动轮询单元Polling Device和被动监听单元Listening Device两种。

最早将NFC与汽车联系起来，其实要倒推到2010年，在诺基亚联合手机制造商与汽车制造商成立汽车互联联盟CCC(Car Connectivity Consortium)的时候。此时，CCC的目标之一就是能够制定出普适的标准，推行NFC在汽车上的应用。典型的应用如：汽车无钥匙进入、汽车无线支付、无线投屏、车载终端无线充电等等。

NFC工作模式

NFC有三种工作模式：NFC-A，NFC-B，NFC-F。三种方式的特点如下：

| NFC Type | | Coding | Modulation | Data rate | Frequency |
|----------|----------|-----------------|------------------------|------------------|--------------------------------|
| NFC-A | Uplink | Modified Miller | 2-ASK 100% | 106 kbit/s | 13.56 MHz |
| | Downlink | Manchester | Load modulation (ASK) | 106 kbit/s | 13.56 MHz ± 848 kHz subcarrier |
| NFC-B | Uplink | NRZ-L | 2-ASK 10% | 106 kbit/s | 13.56 MHz |
| | Downlink | NRZ-L | Load modulation (BPSK) | 106 kbit/s | 13.56 MHz ± 848 kHz subcarrier |
| NFC-F | Uplink | Manchester | 2-ASK 10% | 212 / 424 kbit/s | 13.56 MHz |
| | Downlink | Manchester | Load modulation (ASK) | 212 / 424 kbit/s | 13.56 MHz |

图26 NFC工作模式

车联网测试解决方案

根据上文提到的车联网的介绍，本章主要介绍车联网中所涉及的各种无线通信测试，包括：DSRC、C-V2X、2G/3G/4G/5G、GNSS、WLAN、Bluetooth和NFC等。

DSRC/IEEE 802.11p测试解决方案

罗德与施瓦茨提供专用设备针对IEEE 802.11p测试信号的产生和分析，包括研发测试方案、产线测试方案和一致性测试方案，如下图所示：



图27 DSRC/IEEE 802.11p测试方案一览

DSRC/IEEE 802.11p研发测试方案

针对研发测试，罗德与施瓦茨公司提供高端的信号源和频谱仪方案，用于验证802.11p模块的性能测试，包括发射机测试和接收机测试，其中，SMW200A用于接收机测试，FSW用于发射机测试，针对802.11p模块的GNSS测试，可以使用SMBV100A或者SMW200A测试。

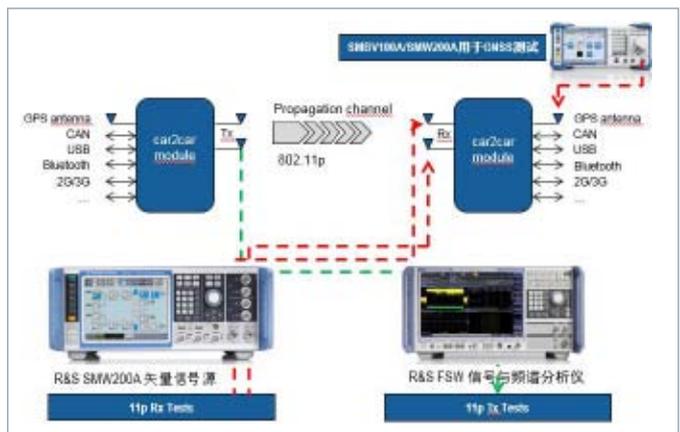


图28 DSRC/IEEE 802.11p研发测试方案框图

DSRC/IEEE 802.11p发射机测试

发射机的测试可分为两部分：调制质量和频谱质量。其中频谱质量需要使用FSW/FSV-K91p选件完成测试，测试内容包括：频谱发射模板SEM、杂散发射、占用带宽OBW、邻道功率泄露比ACLR等；调制质量包括：EVM、频谱平坦度、载波泄露等。

频谱发射模板SEM：测试802.11p模块发射信号在规定频段内信号功率分布情况；

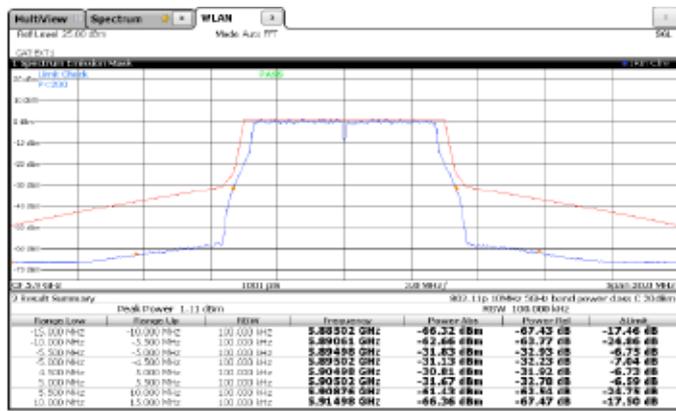


图29 DSRC/IEEE 802.11p频谱发射模板测试

杂散发射：除去带外辐射，由谐波、寄生辐射、交调及频率变换等引起的无用辐射效应；

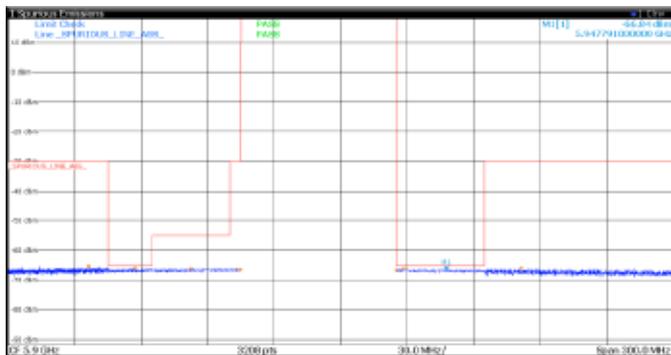


图30 DSRC/IEEE 802.11p杂散发射测试

EVM：主要针对802.11p的信号分析，采用FSW/FSV-k91p选件可直接完成测试；

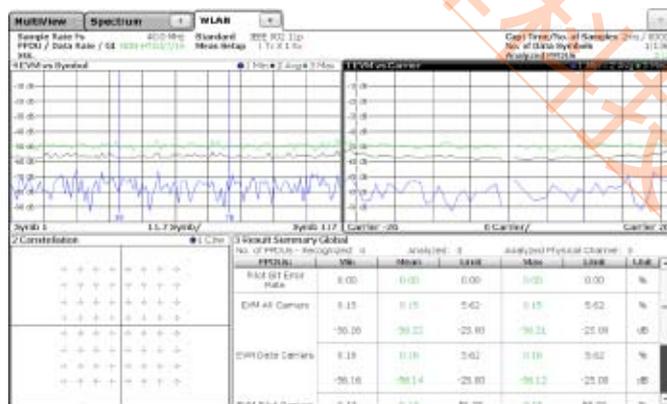


图31 DSRC/IEEE 802.11p EVM测试

频谱平坦度：主要验证每个子载波的幅度平坦度特性；

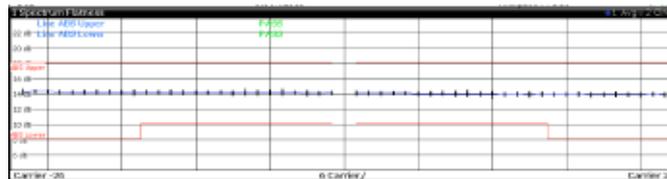


图32 DSRC/IEEE 802.11p 频谱平坦度测试

载波泄露：802.11p没有使用DC子载波，因此，载波泄露会影响DUT的效率；

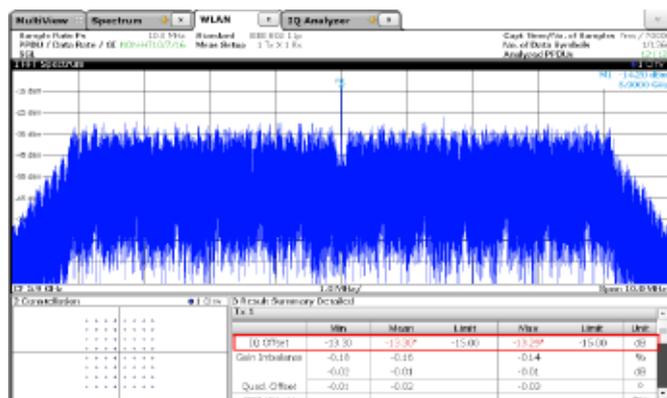


图33 DSRC/IEEE 802.11p 载波泄露测试

DSRC/IEEE 802.11p接收机测试

接收测试，主要使用矢量源SMW发送802.11p模块需要的调制信号，用于接收机的灵敏度以及抗干扰性能测试，保证802.11p模块正确的接收和解码。其测试内容包括：灵敏度、最大接收电平、邻信道抑制比、非邻信道抑制比、空闲信道评估CCA等。

针对802.11p的接收机测试，需要信号源产生用于测试的物理层信号配置和MAC帧配置，如下：

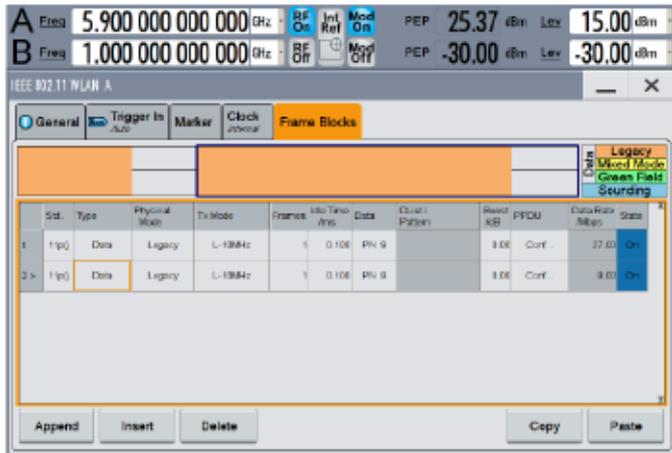


图34 DSRC/IEEE 802.11p信号物理层设置

接收灵敏度：验证802.11p模块在最小输入电平下的工作能力；根据规范ETSI EN 302 571的需求，802.11p模块按照不同调制方式下的接收灵敏度如下：

| Modulation | Coding Rate | 20MHz (dBm) | 10MHz (dBm) | 5MHz (dBm) |
|------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| BPSK | 1/2 | -82 | -85 | -88 |
| BPSK | 3/4 | -81 | -84 | -87 |
| QPSK | 1/2 | -79 | -82 | -85 |
| QPSK | 3/4 | -77 | -80 | -83 |
| 16QAM | 1/2 | -74 | -77 | -80 |
| 16QAM | 3/4 | -70 | -73 | -76 |
| 64QAM | 2/3 | -66 | -69 | -72 |
| 64QAM | 3/4 | -65 | -68 | -71 |

图35 DSRC/IEEE 802.11p 接收灵敏度需求

最大输入功率：验证802.11p模块在大信号输入条件下的工作能力；根据规范ETSI EN 302 571的需求，802.11p模块在-30dBm功率下，误包率PER不能超过10%；邻信道/非邻信道抑制比：验证802.11p接收机在相邻信道或非相邻信道有干扰的情况下的工作能力；根据规范ETSI EN 302 571的需求，802.11p接收机在邻信道和非邻信道的抑制比需求如下：

| Modulation | Coding Rate | Adjacent channel rejection (dB) | Nonadjacent channel rejection (dB) |
|------------|-------------|---------------------------------|------------------------------------|
| BPSK | 1/2 | 28 | 42 |
| BPSK | 3/4 | 27 | 41 |
| QPSK | 1/2 | 25 | 39 |
| QPSK | 3/4 | 23 | 37 |
| 16QAM | 1/2 | 20 | 34 |
| 16QAM | 3/4 | 16 | 30 |
| 64QAM | 2/3 | 12 | 26 |
| 64QAM | 3/4 | 11 | 25 |

图36 DSRC/IEEE 802.11p 邻信道/非邻信道抑制比需求

空闲信道评估CCA：验证802.11p接收机判断信道是否被占用还是空闲的能力，如果被占用，802.11物理层将指示CCA为繁忙标识；测试方法如下：

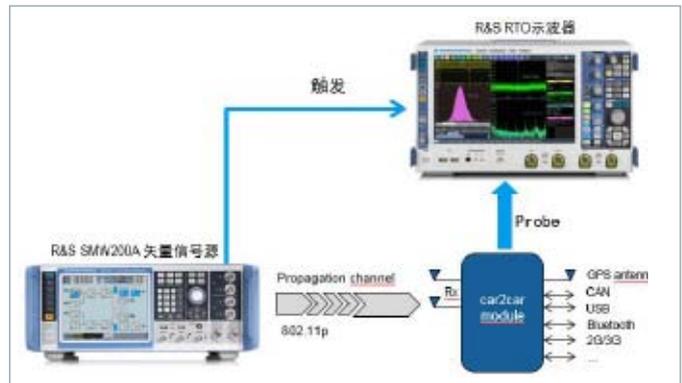


图37 DSRC/IEEE 802.11p空闲信道评估测试框图

DSRC/IEEE 802.11p衰落场景测试

汽车通信很关键的一点就是要验证在汽车移动过程当中的通信有效性。汽车在移动过程当中会带来多普勒平移和衰落，我们一定希望能够在实验室就可以模拟这样一个衰落场景和环境。SMW200A专门提供针对802.11p的衰落场景，如下：

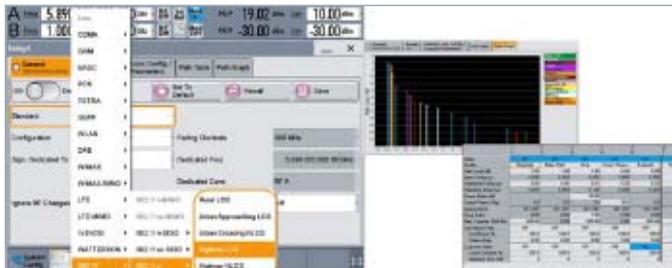


图38 DSRC/IEEE 802.11p衰落场景设置

DSRC/IEEE 802.11p一致性测试系统

罗德与施瓦茨公司的R&S ITS100测试系统，可以用于测试DSRC/IEEE 802.11p通信的一致性测试，基本配置包括：

- R&S®SMW200A矢量信号源
- R&S®FSV30矢量信号与频谱分析仪(可选FSW)
- R&S®OSP-ITS 天线开关/合路器 + 滤波器
- R&S®NRP-Z81, R&S®NRP-Z31功率计

Control PC, 线缆, 机柜

针对带有GNSS接收模块及特别需求的被测件，可以选配如下仪表：

- R&S®SMBV100A GNSS卫星导航模拟器(可选SMW200A)
- R&S®NGMO 电源(针对特殊条件及DUT自动化)

测试平台如下：



图39 DSRC/IEEE 802.11p一致性测试系统

罗德与施瓦茨公司的R&S ITS100测试系统，特色如下：

- 业界第一个、且目前唯一的全自动化(802.11p)测试系统
- 支持ETSI EN 302 571标准的R&TTE测试
- 支持最新的RED测试
- 支持C2CCC组织定义的多径衰落下性能测试

目前，该系统已经全面支持欧洲、美国、日本等国家的DSRC规范测试：

- 欧洲-RF ITS ETSI EN regulatory test cases (RED): Reference ETSI EN 302 571 V2.0.2
- 欧洲- RF ITS C2CCC Performance test cases: Reference ETSI EN 302 571 V2.0.2
- 美国-RF ITS IEEE test cases: Reference IEEE 802.11-2012
- 日本-RF ITS TELEC test cases: Reference TELEC T257 (V2.0)
- 日本-RF ITS ARIB test cases: Reference ARIB STD-T109 (V1.2)

DSRC/IEEE 802.11p产线测试方案

罗德与施瓦茨公司使用无线通信综测仪CMW500或CMW100结合TS7124屏蔽箱，可以用于802.11p技术的产线测试，如下图所示：



图40 DSRC/IEEE 802.11p产线测试(基于CMW500或CMW100平台)

该方案的特色如下：

- 紧凑型交钥匙测试解决方案，包括：校准、认证或终测；
- 接收机、发射机和天线测试，包括：蜂窝通信和非蜂窝通信；
- 测试时间优化，最大化产能设计；
- 占用空间小、灵活性强；
- 全自动化测试，远程控制方案；

DSRC/IEEE 802.11p自动化测试方案

针对自动测试，罗德与施瓦茨公司提供R&S CONTEST自动化测试软件，并结合开关OSP，可以用于上述测试方案的自动化测试方法，下图所示：

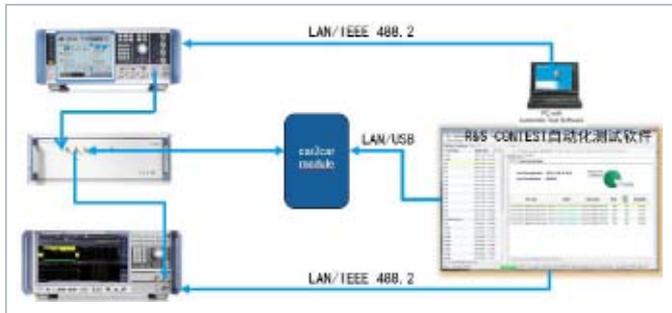


图41 DSRC/IEEE 802.11p自动化测试框图

本方案同样可以用于CMW500/CMW100，或者经济型的SMBV+FSV/FPS测试平台。另外，开关OSP可以使用各种耦合器滤波器分离元器件代替。

C-V2X测试解决方案

目前的C-V2X标准，还不是特别完善，目前3GPP规定了LTE-V2X TM4的具体测试规范。由于C-V2X标准中，LTE-V2X-Cell蜂窝移动通信在其中扮演非常重要的作用，主要体现在传统车联网Telematics的应用上。因此，C-V2X的测试方案，主要从两个方面展开，一是传统车联网Telematics的测试，即LTE-V2X-Cell蜂窝通信的测试解决方案；另一个领域是目前规范探讨最成熟的LTE-V2V TM4的测试解决方案。

LTE-V2X-Cell研发测试方案

罗德与施瓦茨提供一整套完整的设备用于传统车联网Telematics的无线通信的测试，包括研发测试方案、产线测试方案和一致性测试方案，如下图所示：



图42 蜂窝通信设备测试方案一览

针对研发测试，罗德与施瓦茨公司提供高端的信号源和频谱仪方案，用于验证蜂窝通信模块的性能测试，包括发射机测试和接收机测试，其中，SMW200A用于接收机测试，FSW用于发射机测试，针对蜂窝通信模块的GNSS测试，可以使用SMBV100A或者SMW200A测试。

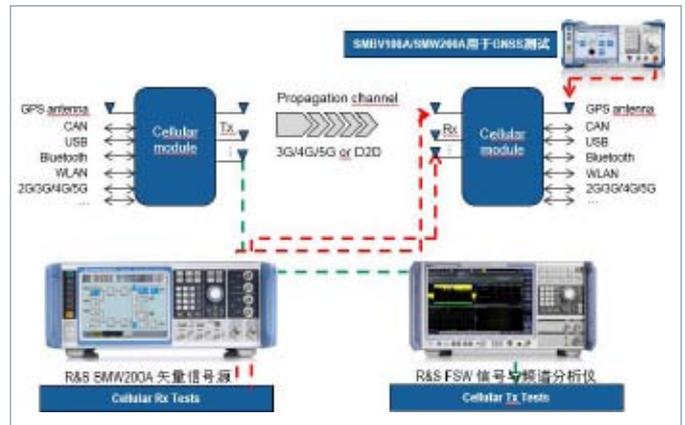


图43 蜂窝通信设备研发测试方案框图

I LTE-V2X-Cell发射机测试

发射机的测试可分为两大部分：调制质量和频谱质量。其中，频谱质量需要使用FSW/FSV配置2G/3G/4G选项完成测试，测试内容包括：频谱发射模板SEM、杂散发射、占用带宽OBW、邻道功率泄露比ACLR等；调制质量包括：EVM、频谱平坦度、载波泄露等。

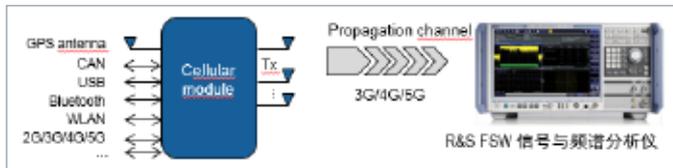


图44 蜂窝通信设备发射机框图

根据3GPP规范要求，本方案提供的测试项目如下：

- I 信道功率 (Channel Power)
- I ACLR, SEM, OBW, Spurious
- I 载波频率误差 (Carrier Frequency Error)
- I 符号时钟误差 (Symbol Clock Error)
- I 导频误码率 (Pilot BER)
- I EVM vs. Carrier / Symbol
- I IQ偏移和不平衡 (IQ offset & imbalance)
- I 群时延 (Group Delay)
- I PVT

R&S®FSW/FSV频谱仪可以进行多任务测试，一次性完成2G/3G/4G等不同通信制式的测试，大大提高了测试的效率：



图45 FSW/FSV进行多任务测试

I LTE-V2X-Cell接收机测试

接收测试，主要使用矢量信号源SMW发送GSM、WCDMA、LTE等通信信号，用于接收机的灵敏度以及抗干扰性能测试，保证蜂窝通信模块正确的接收和解码。其测试内容包括：灵敏度、邻信道抑制比、阻塞特性、动态范围、MIMO和Beamforming特性测试以及衰落场景下的性能评估等。



图46 蜂窝通信设备接收机测试框图

根据3GPP规范要求，本方案可以提供的测试项目如下：

- I 基本的接收测试
- I 参考灵敏度 (Sensitivity)
- I 动态范围 (Dynamic Range)
- I 阻塞特性 (Blocking)
- I 在信道选择性 (ICS)
- I 衰落影响 (Fading)
- I 邻信道选择性 (ACS)
- I MIMO、Beamforming测试
- I 衰落条件下的接收测试
- I 可重复性的实时信道衰落
- I 预定义3GPP 2G/3G/4G衰落场景
- I 支持自定义衰落场景，可配置速度、多径数和衰落模型
- I 单表支持MIMO、Beamforming衰落模拟

I LTE-V2X-Cell 5G NR测试方案

5G的测试，需要高频、高带宽的仪表才能进行测试，罗德与施瓦茨公司提供一整套的关于5G的测试，其中，包括研发测试、产线测试、Sub 6GHz的测试、毫米波测试、Massive MIMO测试等内容，如下：



图47 蜂窝通信设备5G NR测试方案一览

LTE-V2X-Cell产线测试方案

罗德与施瓦茨公司的CMW平台可以一键完成发射机和接收机的测试，同时，在信令模式下，不需要控制芯片，只需要和产品保持信令连接即可完成测试，如下图所示，CMW500一键完成LTE通信的发射机和接收机测试结果截图：

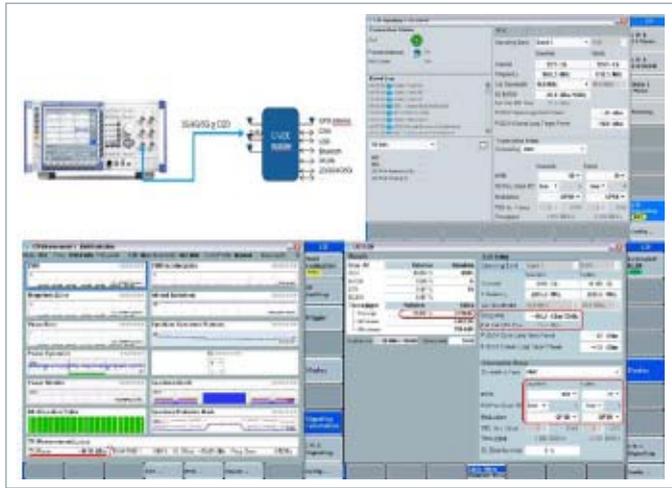


图48 LTE信令模式下的连接和一键测试功能

5G Sub 6 GHz的测试、可以使用CMW100直接完成测试，其特点如下：

- 连续频率覆盖6 GHz，带宽高达160 MHz
- 多种通信制式集合，支持蜂窝和非蜂窝 (GSM, WCDMA, LTE, WLAN, BT, other)
- 可并行测试8个射频端口
- 高的测量性能和测量精度
- 支持宽范围的速度优化，减少测试时间，优化测试效率

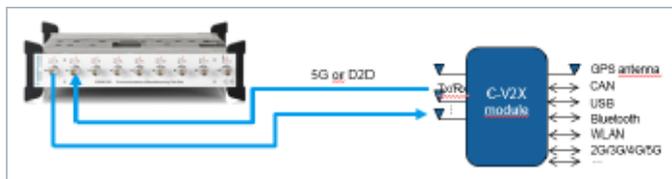


图49 5G NR非信令模式下测试框图

LTE-V2X-Cell一致性测试方案

罗德与施瓦茨公司的R&S TS8980测试系统，可以用于测试蜂窝通信设备的一致性认证测试。业界唯一的GSM、WCDMA、LTE测试平台，通过集成和升级CMW综测仪，可轻松升级至5G测试方案，同时，该测试系统提供用户界面友好、功能强大的R&S CONTEST测试软件，用于一致性认证的自动化测试，如下：

- R&S®TS8980系统功能强大，有如下特点：
- LTE (Rel. 8 and Rel. 9) and LTE-Advanced (PRO)
- WCDMA (Rel. 99 to Rel. 9 incl. HSPA, R7 MIMO, (DB-)DC-HSDPA)
- GSM (Rel. 99 to Rel. 9 incl. GPRS, EDGE, DARP, VAMOS)
- 支持运营商可接受的定制测试计划 VzW, at&t, Sprint, USCC, CMCC, CT...
- 支持法规测试 acc. to R&TTE / RED and TELEC
- 用户界面友好、功能强大的 R&S CONTEST 软件
- 并行测试
- Optional RRM / IRAT: LTE FDD, LTE TDD, WCDMA, GSM, C2K, TD-SCDMA

根据此方案，用户可按照3GPP规范的需求，完成所有测试，如下：

| RAT | Spec. No. | Topic |
|----------|-------------|--|
| | TS 26.132 | Speech and video telephony terminal acoustic test specification |
| GSM | TS 51.010 | RF & RRM & Protocol & GNSS |
| WCDMA | TS 34.121 | RF & RRM test (FDD); |
| WCDMA | TS 34.123 | Protocol Test |
| TD-SCDMA | TS 34.122 | RF & RRM test (TDD) |
| WCDMA | TS 34.171 | Assisted Global Positioning System (A-GPS); (FDD) |
| WCDMA | TS 34.172 | Assisted Global Navigation Satellite Systems (A-GNSS); (FDD) |
| WCDMA | TS 34.229 | Internet Protocol multimedia call control protocol based on Session Initiation Protocol (SIP) and Session Description Protocol (SDP) |
| LTE | TS 36.521-1 | RF conformance Test |
| LTE | TS 36.521-3 | RRM conformance test |
| LTE | TS 36.523 | Protocol conformance test |
| LTE | TS 36.571 | UE positioning conformance test |

图50 蜂窝通信设备一致性认证测试规范一览

eCall/ERA-GLONASS测试

eCall/ERA-Glonass测试框图如下：

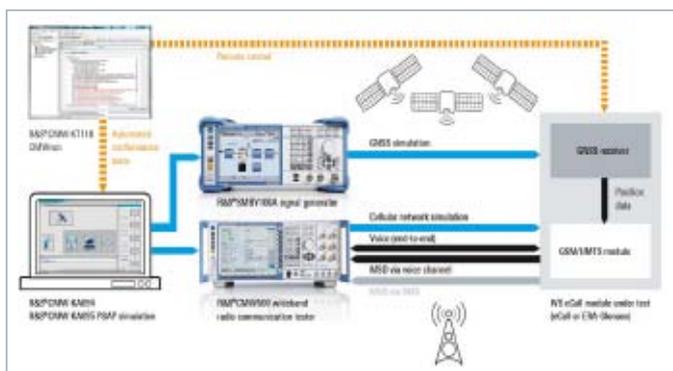


图59 eCall/ERA-Glonass测试框图

系统模拟在任何eCall/ERA-GLONASS测试规范中都是一项关键技术，有助于确保测试例的精确重现，并且使组件研发团队能够利用自动化的可重复测试，对性能开展可靠的基准测试。

车联网LBS测试

车联网LBS定位，主要是基于蜂窝通信网络获取终端的大致位置信息，然后快速搜索卫星信号，提供定位时间和定位精度。罗德与施瓦茨公司提供的基于SMBV卫星导航模拟器和CMW无线通信综测仪平台相结合的方式，完成TS-LBS测试，其测试框图如下：

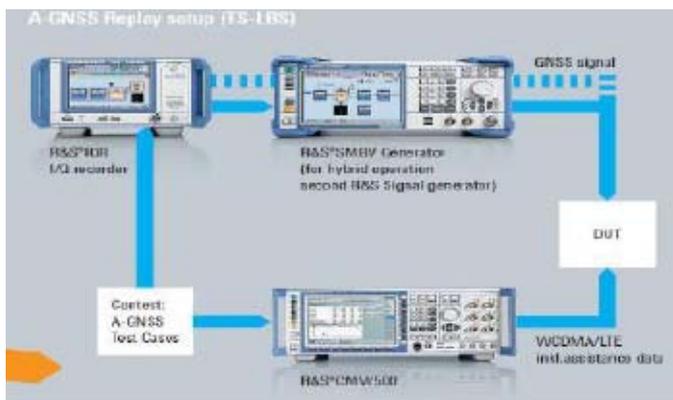


图60 车联网TS-LBS测试框图

GNSS RED测试

RED - 新的无线电设备规程，自2016年6月13日起全面取代旧的 RTTED 1999/5/EC，即R&TTE规程，转换期为1年，也即2017年6月13日起强制执行，参考规范ETSI EN 303 413。其测试框图如下：

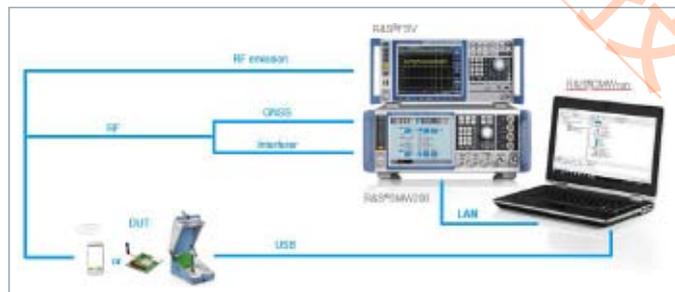


图61 车载导航RED测试框图

车内无线连接测试

汽车内部无线连接，主要包括WLAN、Bluetooth和NFC等几种无线通信方式。罗德与施瓦茨公司提供符合测试规范需求的各种等级的测试方案，包括：研发非信令测试、研发信令测试及线测试三种方案，如下示：



图62 车内无线连接测试方案一览

WLAN测试

WLAN的测试，主要基于CMW500平台，可以提供信令的快速连接及一键测试，其测试框图如下：

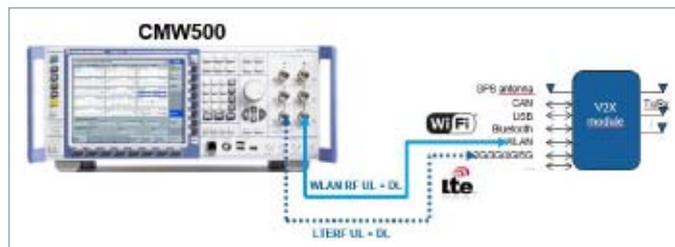


图63 车内WLAN无线连接测试框图

CMW500可提供WLAN发射机和接收机的测试结果，如下：

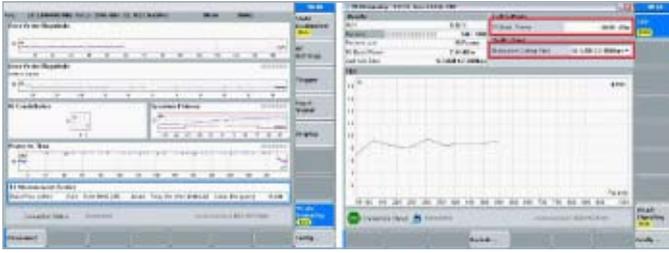


图64 车内WLAN无线连接测试结果显示

Bluetooth测试

Bluetooth的测试，同样基于CMW500平台，可以提供信令的快速连接及一键测试，其测试框图如下：



图65 车内Bluetooth无线连接测试框图

CMW500可提供蓝牙的发射机和接收机测试结果，如下：



图66 车内Bluetooth无线连接测试结果显示

上述是通过CMW进行蓝牙综测间接反映蓝牙的无线射频性能高，不过针对蓝牙语音通信，可以直接通过语音质量评估MOS打分，直接获取蓝牙语音通信性能。如下图所示：



图67 车内蓝牙语音质量评估框图

WLAN及Bluetooth一致性认证测试

R&S TS8997无线连接测试认证系统，符合ETSI EN 300328 V1.8.1/V1.9.1 (2.4 GHz频段) 和ETSI EN 301893 V1.7.1/V1.8.1 (5 GHz频段) 的认证测试，包括：WLAN 802.11a/b/g/n/ac和Bluetooth的测试。

R&S®TS8997基本平台是信号源和频谱仪组成，为了符合WLAN和Bluetooth的一致性认证测试，可以在机柜里面配置CMW500平台，提供信令的快速连接及一键测试，其测试框图如下：



图68 车内WLAN级Bluetooth无线连接一致性认证测试

R&S®TS8997可测量2.4 GHz和5 GHz频段范围内的宽带无线设备 (例如带有无线电接口的设备) 中通常采用的技术, 包括 WLAN 802.11a/b/g/n/ac和Bluetooth无线通信技术。该测试系统可满足的测试需求, 如下:

符合ETSI EN 300 328的测试用例

| |
|-----------------------------------|
| 射频输出功率 |
| 占空比, Tx系列, Tx-间隙 |
| 驻留时间、最小频率占用、跳频系列 (仅适用于跳频DUT) |
| 跳频分离 |
| 煤质利用 (Medium Utilization - MU) 因子 |
| 自适应 |
| 占用信道带宽 |
| 发射机带外辐射干扰 |
| 发射机杂散辐射干扰 |
| 接收机杂散 |
| 接收机阻塞 |
| 地理定位能力 |

符合ETSI EN 301 893的测试用例

| |
|-----------------------------|
| 载频精度 |
| 占用信道带宽 |
| 射频输出功率, 发射功率控制 (TPC), 功率谱密度 |
| 发射机杂散 |
| 接收机杂散 |
| 动态频率选择(DFS) |
| 自适应 |
| 接收机阻塞 |
| 用户访问限制 |
| 地理定位能力 |

NFC测试

NFC的测试, 包括轮询模式测试和监听模式测试, 主要基于信号源SMBV、频谱仪FSV/FSW (或者示波器RTO), 结合自动测试软件FS-K112PC。

■ NFC轮询模式测试

下图的测试框图中, 根据用户的测试需求, 可使用FSW/FSV代替RTO完成测试:

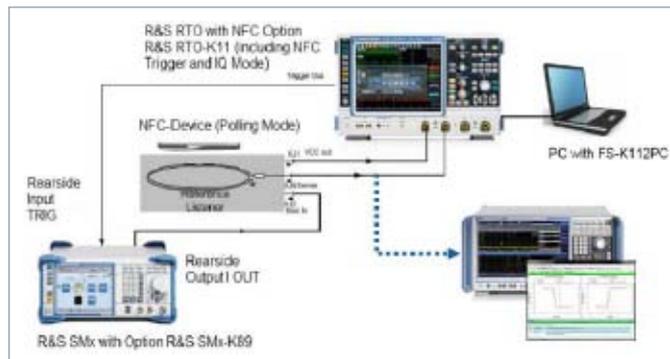


图69 车内NFC无线连接轮询模式测试框图

■ NFC监听模式测试

和轮询模式类似, 也可使用FSW/FSV代替RTO完成测试, 如下:

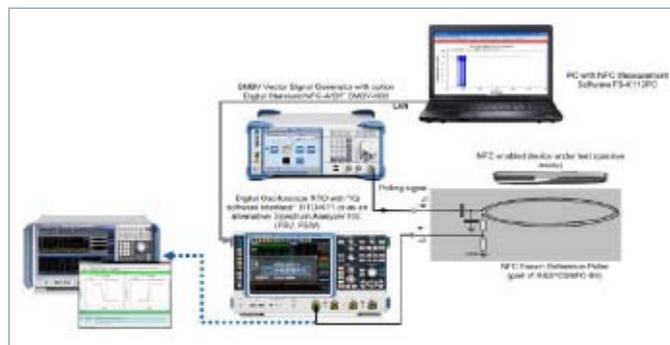


图70 车内NFC无线连接监听模式测试框图

上述两种模式的测试, 都是基于FS-K112PC软件完成。罗德与施瓦茨公司的NFC测试方案, 可完成NFC-A, NFC-B, NFC-F三种模式下的测试项目, 如下:

■ 主动查询模式

- 载波频率精度 (Carrier Frequency Accuracy)
- 功率测量 (Power Level measurement)
- 波形特征测量 (Waveform Characteristic Measurement)
- 负载调制灵敏度 (Load Modulation Sensitivity)
- 门限值测试 (Threshold level test)

被动收听模式

- 负载调制测量 (Load Modulation Measurement)
- 功率接收测试 (Power reception test)
- 帧延迟时间 (Frame delay time)

车联网无线通信记录与回放测试

车联网中涉及的无线通信制式非常多。罗德与施瓦茨公司提供不受通信制式影响的记录回放测试方案，基于IQR记录仪，结合频谱仪和信号源，可完成在频谱仪信号源工作频段及带宽内的所有信号的记录与回放，如下：

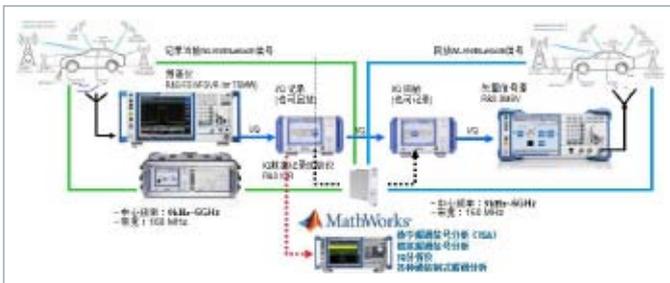


图71 车联网无线信号记录与回放测试框图

车联网典型应用配置

DSRC & C-V2X通信测试配置

| 测试项目 | | DSRC IEEE 802.11p 测试解决方案 | | | C-V2X 测试解决方案 | | |
|--------------|----------|-----------------------------|-----|-----|--------------|-----|-----|
| | | 研发 | 一致性 | 产线 | 研发 | 一致性 | 产线 |
| 产品型号 | 产品名称 | | | | | | |
| R&S SMV200A | 矢量信号源 | ● | | | ● | | |
| R&S SMBV100A | 矢量信号源 | | | ● | | | (○) |
| R&S SGT100A | 矢量信号源 | | | | | | |
| R&S FSW | 信号与频谱分析仪 | ● | | | ● | | |
| R&S FSWAR | 信号与频谱分析仪 | | | ● | | | (○) |
| R&S CMW500 | 无线通信综测仪 | (○) | | (○) | ● | | ● |
| R&S CMW270 | 无线通信综测仪 | (○) | | | | | (○) |
| R&S CMW100 | 无线通信综测仪 | (○) | | (○) | | | ● |
| R&S ITS100 | ITS 测试系统 | | ● | | | | |
| R&S TSB60 | 通信测试系统 | | | | (○) | ● | |
| R&S RTD | 示波器 | ● | | | | | |
| R&S RTM | 示波器 | (○) | | | | | |

RFID、GNSS、WLAN/Bluetooth/NFC通信测试配置

| 测试项目 | | RFID | GNSS | WLAN | Bluetooth | NFC |
|--------------|-----------|------|------|------|-----------|------|
| 产品型号 | 产品名称 | 测试方案 | 测试方案 | 测试方案 | 测试方案 | 测试方案 |
| R&S SMV200A | 矢量信号源 | | ● | (○) | (○) | (○) |
| R&S SMBV100A | 矢量信号源 | ● | (○) | (○) | (○) | ● |
| R&S SGT100A | 矢量信号源 | | | (○) | (○) | (○) |
| R&S FSW | 信号与频谱分析仪 | | ● | (○) | (○) | (○) |
| R&S FSWAR | 信号与频谱分析仪 | ● | (○) | (○) | (○) | ● |
| R&S CMW500 | 无线通信综测仪 | | ● | ● | ● | |
| R&S CMW270 | 无线通信综测仪 | | (○) | (○) | (○) | |
| R&S CMW100 | 无线通信综测仪 | | | (○) | (○) | |
| R&S TC2800 | RFID 信令单元 | ● | | | | |
| R&S TSB897 | 无线设备认证系统 | | | ● | ● | |
| R&S RTD | 通信测试系统 | | | | | (○) |

注 1：●表示推荐仪表，(○)表示可选仪表；

注2：测试项目需要配合相应选件才能完成，部分测试项目需要用户提供相应的测试附件；

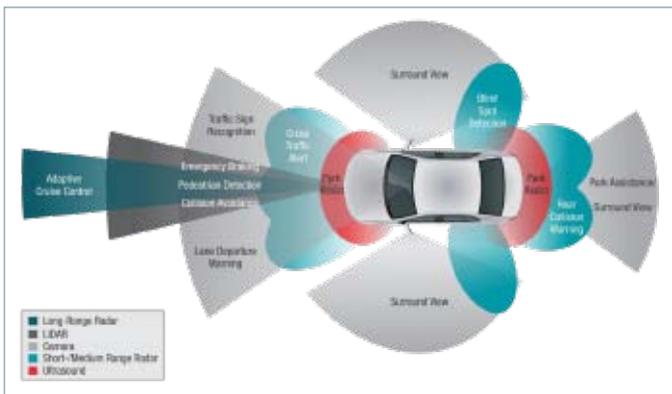
注3：具体测试仪器的性能、选件等详情，请联系R&S公司的技术支持，详细参数可参考产品手册。

二 车载雷达测试平台

车载雷达测试的需求分析

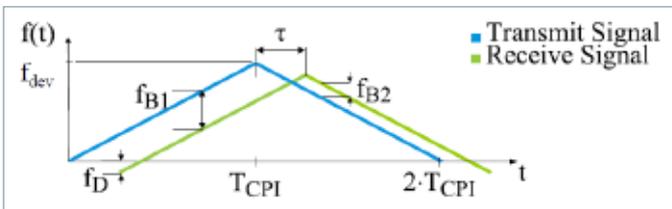
随着中国公路通车里程和汽车保有量多年来持续的大幅增长，驾驶员对交通安全的需求也在不断提升，如何提高汽车的安全性已成为汽车行业的重要任务和巨大挑战。为实现安全便捷地出行，车载雷达等安全辅助技术也得到广泛关注。

智能化的汽车不可或缺的便是对周边物体的感知。在智能化的汽车上可多达数十种雷达。国际上采用的车载防撞雷达主要有SRR (短距离雷达) 和LRR (长距离雷达)。短距离雷达有效作用距离15 m~30 m，适用于低速近距离防撞；长距离雷达有效距离100~250 m，适用于远距离防撞。目前，在20 GHz以下很难实现波束成形，而由于大气衰减和技术限制，100 GHz以上也很少使用。因此防撞雷达主要分配24 - 29 / 60 - 61 / 77 - 81 GHz这几个频段。长距离雷达主要采用77 GHz频段。



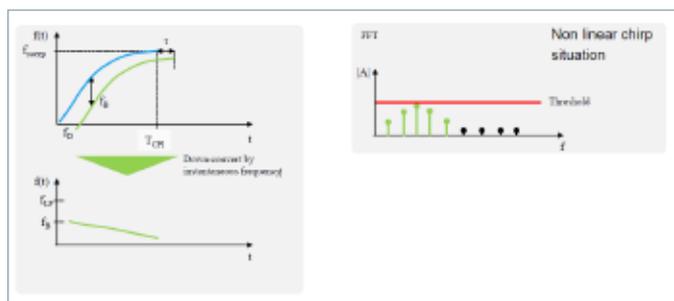
车辆ADAS系统整体示意图，车载防撞雷达主要应用于其中的自适应巡航控制、紧急刹车/行人检测和碰撞避免等方面，即中/长距离目标的距离/速度和角度探测。

汽车防撞雷达的实现原理主要是调频连续波 (FMCW) 方式，FMCW (frequency modulation continuous wave) 雷达主要通过发射信号和反射信号做互相关，检测出其间的差拍频率和多普勒频移。实现方式简单，信号处理难度小，测量精度较高，比较适宜测量近距离目标，故作为目前车用防撞雷达的普遍选择方式。



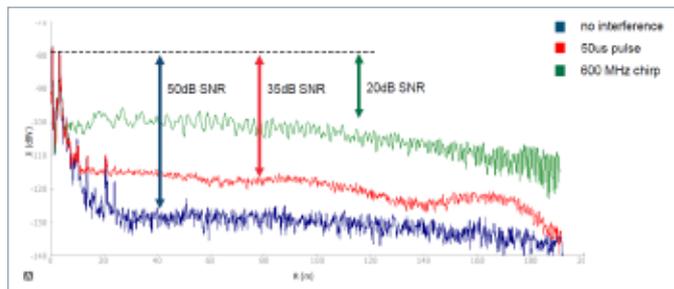
车载雷达信号及其测量结果示意图，蓝色为发射信号，绿色为反射信号，由于反射信号具有滞后特性，以及两段调频信号之间的频率差，可解出目标的距离R和径向速度v。

雷达系统的关键参数包括距离分辨率、径向速度分辨率，以及雷达探测距离和径向速度的精度等。对于FMCW雷达，其调频带宽决定了距离分辨率，相关处理时间CPI (coherent processing interval) 决定了径向速度分辨率。而距离和径向速度探测精度则主要由雷达回波信号的信噪比决定。实际上，FMCW雷达发射信号的质量在一定程度上对雷达探测精度也有很大影响，其中第一个关键因素就是调频线性度。下图是较差的调频线性度对测量结果的影响示意图，可以看到信噪比的恶化。



这一部分的解决方案是宽带频谱仪与FMCW信号分析套件，直接测量雷达发射的FMCW信号中，每一段Chirp的线性度，参考第二章。

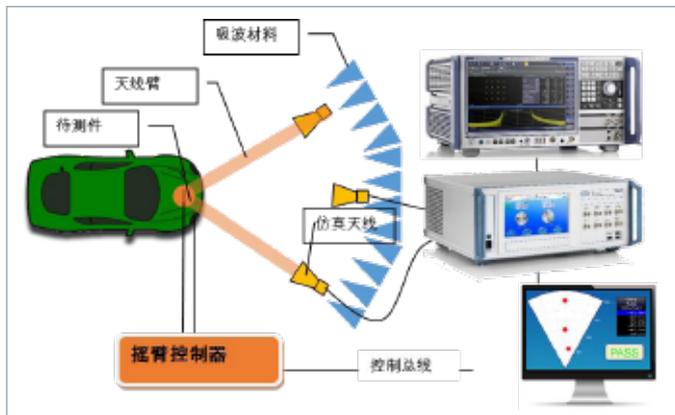
除了雷达自身的因素，外界对雷达的干扰型号也会影响到雷达测量的信噪比。下图是三种情况下的对比，分别是无干扰、脉冲干扰，以及存在扫频干扰时的雷达测量结果显示。可见由于特定干扰信号的存在，尤其是相向来车使用FMCW信号时，对雷达模块的信噪比造成较大影响。



因此需要使用特定的FMCW信号仿真干扰源，测试雷达的抗扰能力。此类测试目前在欧洲已经成为RED指令的一部分，后续也会成为上路车辆的必测项目之一。R&S推出的测试方案是使用宽带矢量信号源与倍频器和相应软件，产生出来车的FMCW信号，实现高精度仿真测试。R&S雷达信号产生方案请见第三章。

第三，现代车载防撞雷达需要有来车角度测量的功能，因此往往选配多个发射/接收天线，以MIMO方式实现更高的探测精度和角度指示。此时需要测量的第二个内容即是MIMO天线的方向图和发射功率。需要使用仪器或实物仿真特定角度、特定RCS和多普勒频移的反射信号。此外，在ADAS系统中，雷达和控制系统需要完成动态的目标识别并做出相应的规避动作。因此动态环境的目标仿真也成为以雷达为核心的ADAS系统研发阶段的必备测试项目。

R&S在此类需求的基础上，开发了目标仿真器或回波发生器，配合屏蔽暗室、转台、软件等一系列完整的测试方案。该方案请见第四至第六章。



最后，由于车载雷达都是安装在车辆保险杠内部，因此遮罩(保险杠或车标)对雷达测量结果的影响不可忽视，微小的瑕疵都会对判断目标的方向、频率/速度、乃至探测距离精度产生劣化。无论是在研发过程中检查雷达遮罩的反射传输特性，还是在生产中检查遮罩样品的瑕疵，具有成像特性的完整测试平台能够快速、准确地检查出遮罩或徽标存在的问题。此类测试方案请见第七章。

发射频谱和信号质量测试

车载雷达的工作频带分别是24 GHz、77 GHz、79 GHz。调频的频宽普遍在500 MHz、1 GHz及以上，因此对频谱和信号分析仪提出了新的要求：

- 1、能够覆盖77 GHz频带
- 2、具有1 GHz以上的分析带宽
- 3、具有直接测量扫频线性度的测量选项

R&S的测量方案基于高端频谱和信号分析仪FSW。具有多种选择：在频率覆盖范围方面，可以选择直接覆盖到85 GHz的FSW85，也可以使用较低频段的FSW26或FSW43配合下变频器FS-Z90。



业界领先的FSW85信号与频谱分析仪，可直接分析85 GHz频段，无需变频。



FS-Z90下变频器，工作频段60-90GHz，使用来自FSW的本振信号，进行六倍频以及混频，并将中频信号回传至FSW。对FSW的频段要求较低，FSW26即可使用。结构上是外置单元，可以方便地与测试天线后端相连，并固定于夹具上。

对分析带宽的需求，特定型号的FSW可以选择最高内置2 GHz分析带宽，也可以由FSW输出中频信号，选配相应的RTO示波器，利用示波器的宽带采样能力提取信号实现分析，最高可以分析5 GHz带宽，适应于未来的79 GHz频段、4 GHz带宽雷达测试需求。

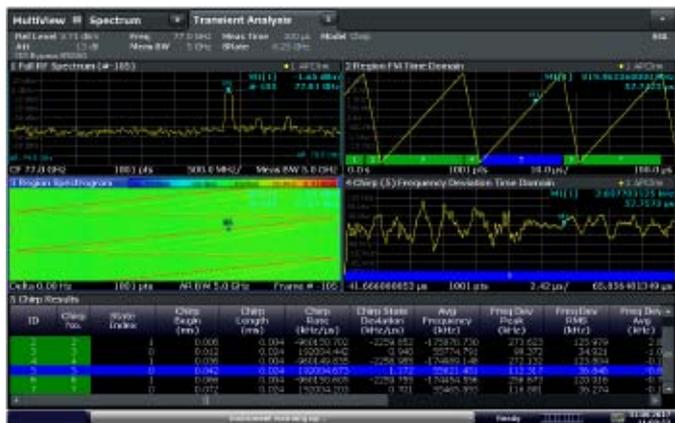


| | 频谱与信号分析仪 | 内置带宽 | 配合RTO示波器 |
|--------|----------------|-----------|----------|
| 直接测量 | FSW85 | 最高2 GHz | 5 GHz宽带 |
| 下变频器方案 | FSW26 + FS-Z90 | 最高512 MHz | 2 GHz宽带 |

测量软件方面，R&S推出了专门测量FMCW信号的测试选项FSW-K60，和FSW-K60C。

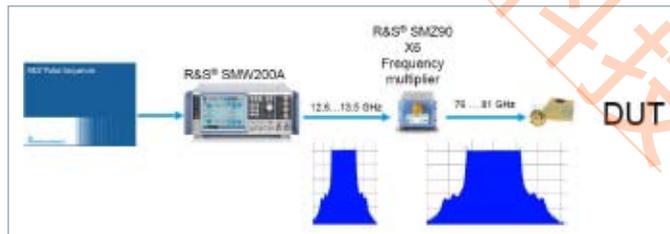
在车载雷达系统中，为了探测多个目标，雷达模块往往使用多种不同调制率的FM信号区段，构成较为复杂的Chirp序列。此时，FSW-K60C选项可以自动识别出每一段调频区段，并进行所有测试，包括起止时间、调频范围、Chirp rate和Chirp线性度等。

下图是FSW-K60C分析77 GHz、5 GHz带宽FMCW信号的示例，不难看出，该模块虽然用了两种调制率的FM信号，但均可被FSW-K60C识别并列入结果中。



雷达信号产生

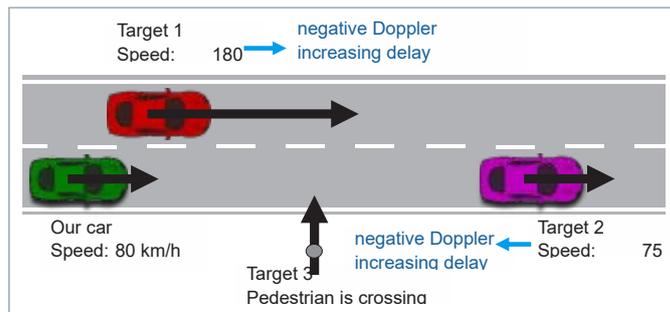
抗干扰测试需要数字信号源产生仿真的宽带调频雷达信号。R&S®SMW200A配合倍频器，可以仿真车辆雷达信号。



- 干扰信号包括
 - 相向来车的雷达信号
 - 其他干扰源的调制信号
- 使用Pulse Sequencer产生干扰信号，包括脉内调制
- SMW产生较低频率的信号
- 使用倍频器扩频 (SMZ90，无ARB功能)

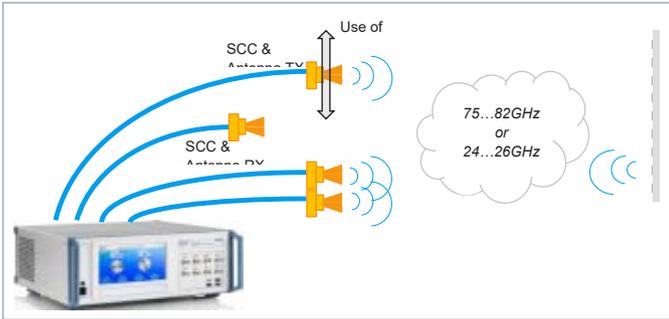
动态目标模拟

R&S®ARTS9510可以实现多目标动态仿真，例如下图所示的场景：



ARTS9510特性如下：

- 模拟目标的动态速度
 - 多普勒频移的变化，如起步和刹车过程
- 最多模拟4个具有不同速度曲线的目标
- 发射单元外置，可模拟目标的不同运动方向
- 模拟的最近距离6 m，最远2.4 km
- 目标的最大速度±700 kph
- 支持24/77 GHz双频段
- 最大带宽1 GHz



ARTS测试配置可以如上图所示，使用多个TX天线，外加摇臂或滑轨，实现多方向目标仿真。从而最大程度地模拟自动驾驶应用中的多目标动态场景。

生产线测试和校准方案

R&S®AREG是近期推出的回波发生器，能够仿真多个目标的距离与多普勒频移：

- 24/77 GHz频段，4 GHz带宽范围
- 多目标配置，可配置参考距离，以及额外的3种不同的目标距离（可定制）
- 可设置多普勒频移和RCS参数
- 可选双天线或单天线（环形器）方案，用于方向识别
- 校准后可用功率计测量待测产品的EIRP
- 后面板中频输出，可配合6 GHz的频谱仪，做OBW频谱测试测试
- 后面板中频输入，可配合6 GHz频段的信号源，注入干扰信号，做抗干扰测试
- 无需与待测产品模块连接



雷达生产线和整车自动测试系统

R&S提出了完整的雷达模块生产线测试平台，主要构成如下：

- 目标模拟器ARTS9510或AREG
- 频谱仪FSW85，或FSW26+示波器RTO2064+ FSW-K60/K60C
- 信号源SMW200A + SMZ90 + Pulse Sequence软件 (K300)
- 功率计NRP110T和接收天线TA85，用于测试EIRP
- 雷达测试暗室ATS1000，或屏蔽箱7124
- 定制的摇臂、转台或滑轨，转台可以倾斜和旋转待测模块，用以测试方向图
- 自动化测试软件QuickStep

演示平台如下所示：

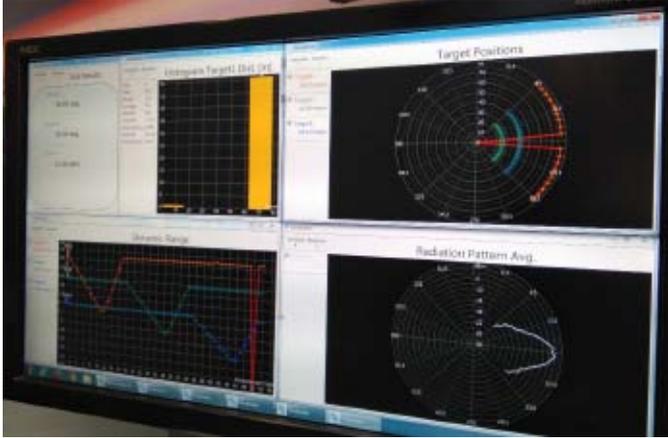


转台（2D）：

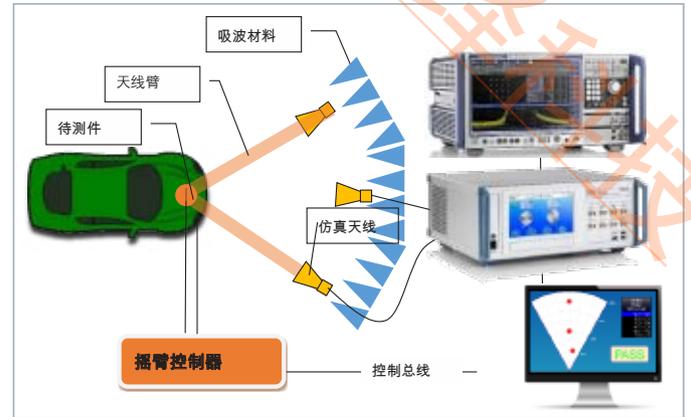


可以测试待测件的：

- EIRP
- 频谱和线性度
- 信噪比
- 角度误差



整车动态场景仿真测试，结构示意图如下：



- 仿真实车运行的场景，实现ACC，弯道跟车，切入切出等多种开环场景
- 配合HIL软件完成基于传感器输入的HIL测试

三 BMS系统测试平台

介绍R&S BMS系统测试解决方案，测试需求，并根据客户需求提供从测试全套解决方案。此方案可以根据客户要求进行修改，适用于新能源汽车BMS设备。

BMS系统简介

随着能源紧缺、石油涨价、城市环境污染的日益严重，替代石油的新能源的开发利用越来越被各国政府所重视。在新能源体系中，电池系统是其中不可或缺的重要组成部分。近年来，以锂电池为动力的电动自行车、混合动力汽车、电动汽车、燃料电池汽车等受到了市场越来越多的关注。动力电池在交通领域的应用，对于减少温室气体的排放、降低大气污染以及新能源的应用有着重要的意义。其中锂电池以高能量密度、高重复循环使用次数、重量轻，以及绿色环保等优势越来越受到人们的关注，所以在手机、笔记本电脑、电动工具等便携式手持设备中已经得到广泛的应用，并已经开始进入电动车、电动汽车等大功率的应用中，成为全球电动汽车发展的热点。

但是由于锂电池在加热、过充/过放电流、振动、挤压等滥用条件下可能导致电池寿命缩短以致损坏，甚至会发生着火、爆炸等事件，因此安全性问题成为动力锂电池商业化推广的主要制约因素。安全型、低成本、长寿命锂离子电池的安全标准、安全评价方法、电池制造过程的安全与可靠性控制以及通过正负极材料、电解质与隔膜优选改善电池安全与可靠性是实现确保大型动力锂离子电池安全可靠，实用化的关键。而电池管理系统 (BATTERY MANAGEMENT SYSTEM)，作为电池保护和管理的核心部件，不仅要保证电池安全可靠的使用，而且要充分发挥电池的能力和延长使用寿命，作为电池和车辆管理系统以及驾驶者沟通的桥梁，电池管理系统对于电动汽车性能起着越来越关键的作用。

BMS系统主要功能

电池管理系统与电动汽车的动力电池紧密结合在一起，对电池的电压、电流、温度进行时刻检测，同时还进行漏电检测、热管理、电池均衡管理、报警提醒，计算剩余容量、放电功率，报告SOC&SOH状态，还根据电池的电压电流及温度用算法控制最大输出功率以获得最大行驶里程、以及用算法控制充电机进行最佳电流的充电，通过CAN总线接口与车载总控制器、电机控制器、能量控制系统、车载显示系统等进行实时通讯。电池管理系统 (BMS) 的简单框图如下图所示：

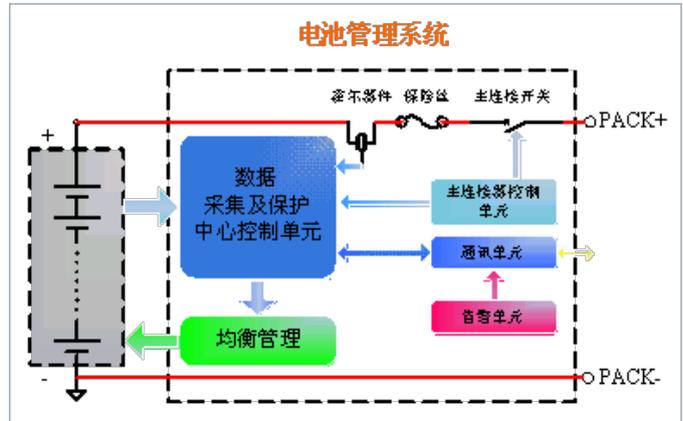


图1 BMS系统框图

BMS系统的主要依据的标准有：

- SAE2006-21-0060 Advances in HEV Battery Management Systems
- QC/T 897-2011 电动汽车用电池管理系统技术条件
- GBT 20234-2015 电动汽车传导充电用连接装置
- GBT 27930-2015 电动汽车非车载传导式充电机与电池管理系统之间的通信协议。

R&S®BMS测试系统

R&S®BMS测试系统基本功能

R&S®BMS测试系统测试实现功能如下：

- 电池总电压和总电流模拟与精度测试；
- 电池单体电压模拟与精度测试；
- 绝缘电阻精度测试；
- 电池组温度管理功能测试；
- 电池组安全控制功能、故障诊断和处理功能测试；
- 电池SOC估算功能测试；
- BMS系统的绝缘电阻、绝缘耐压测试；
- BMS系统的过压和欠压测试；
- BMS系统的高低温测试；
- 系统间通信功能测试；

- 电池充放电控制功能测试；
- 开关量参数模拟测试。

R&S®BMS测试系统硬件组成

R&S®BMS测试系统硬件包括高精度电压模拟模块、高精度恒流源、高精度高压恒压源、高精度温度采集模块、高精度高低温箱、控制电脑、CAN总线分析仪、开关量参数模拟模块、绝缘电阻精度测试模块、BMS供电电源、绝缘电阻测试仪、绝缘耐压测试仪、操作台、通讯模块等组成。

单体电压模拟功能，可以模拟多节电池串联的电池组电压，每节电池的电压可以在0-5 V内调整，电压的分辨率为0.1 mV可以用于测试BMS电池管理系统电压检测精度和对于电池电压高和低的反应，电源的每个通道可以吸收和提供0-2 A的电流，可以用于检测BMS的电池均衡功能。模拟模块可以显示每个通道的电压，可以和被测BMS的测试数据进行比较，得出BMS电压检测精度、电压异常反应、均衡功能。

高精度高压恒压源，可以模拟0-1000 V电池组的电压，可以用于检测BMS总电压检测功能。

高精度恒流源，可以模拟0-500 A的电流，分辨率为0.01 A，可以用于检测BMS电流检测的精度，也可以模拟电池组的充放电曲线，和系统配套实现对BMS的SOC估算功能的验证。

高精度高低温环境实验模拟箱和高精度温度采集模块配合，实现对BMS温度检测精度的检测和BMS对温度过高和过低的反应。

开关量参数模拟模块，由继电器控制板、电源、控制接触器和继电器组成，实时检测BMS对于各种工作状态的报警控制情况，检测BMS开关控制能力和负荷能力。

CAN总线分析仪，通过该接口和BMS对接，通过软件模拟充电机和车辆管理器与BMS进行通讯，测试BMS的通讯能力，以及和充电机握手、充电参数配置、充电过程控制的性能，以及和车辆控制器信息通讯控制的能力。同时记录通讯过程，测试BMS的通讯误码率。

绝缘电阻精度模块和电池组总电压模拟电源配套，模拟真实电池组正负极对机壳绝缘电阻值，通过改变电阻值，测试BMS绝缘电阻的测试精度和系统绝缘改变时BMS的响应。

BMS供电电源，针对不同的供电电压，测试BMS对供电过欠压和掉地供电情况的响应，测试BMS对电源的适应性能。SOC精度估算的验证，通过电流源模拟电池组的充放电曲线

数据，测试BMS的SOC估算能力，还可以通过软件仿真来检测BMS SOC算法的可靠性，通过软件导入充放电历史数据，改变BMS数据的内容，查看SOC值的估算，验证BMS的SOC估算性能。

绝缘电阻测试仪用于测试BMS的绝缘电阻、绝缘耐压测试仪用于测试BMS的绝缘耐压的情况。

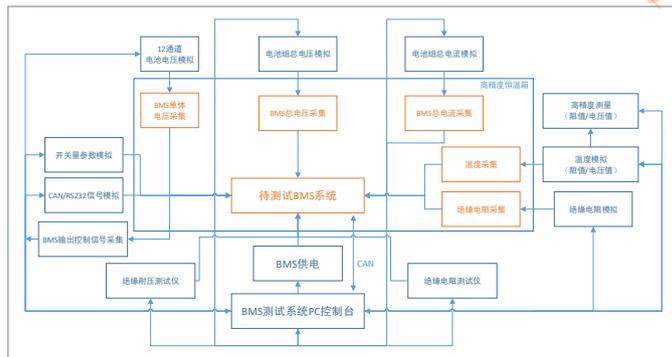


图2 BMS测试系统框图

R&S®TSVP

R&S®TSVP是专门针对于高性能自动测试应用的PCI/PXI插卡式仪表，集成14个PCI槽位，插入不同功能的单元模块可以实现如开放测试测量平台、射频切换、高功率切换、高功率负载仿真等各种不同的测试需求。在R&S®BMS测试系统中，R&S®TSVP可使用多种功能板卡，包括：

- 电源供电/负载模拟板卡
- 万用表测量板卡
- 数字模式I/O模拟与串行通信模拟板卡
- 继电器开关模拟板卡
- 多路开关切换模拟板卡
- 多通道模数采集板卡

高精度恒流源/高精度恒压源

高精度恒流源/高精度恒压源为专门用于BMS电池组仿真的可编程高精度直流电压源。

高精度恒流源指标要求：

- 电流范围：0~500 A (分辨率10 mA)。
- 输出精度：0.1%FD+0.1%RD
- 电流稳定度：0.1%
- 外部电流传感器接线方式：分流器或电流传感器
- 输出方式：电流
- 输出电压范围：0~5 V
- 设备带有液晶显示，和操作键盘，可以在仪表上实现操作。
- 设备带有CAN通讯端口或RS-232通讯端口，可以和系统进行通讯。

高精度恒压源指标要求：

- 输出电压范围：0-1000 V
- 电压显示分辨率：0.01 V
- 精度：0.1%FD+0.1%RD
- 输出电流范围：0-100 mA
- 纹波和噪声：峰峰值650 mV；
- 负载瞬时恢复时间：2 ms；
- 设备带有液晶显示，和操作键盘，可以在仪表上实现操作。
- 设备带有CAN通讯端口或RS-232通讯端口，可以和系统进行通讯。

绝缘电阻精度模块

绝缘电阻精度模块，模拟真实电池组正负极对机壳绝缘电阻值，通过改变电阻值，测试BMS绝缘电阻的测试精度和系统绝缘改变时BMS的响应。

- 输入电压等级：100-500 V；
- 可模拟正负端对地电阻；
- 电阻值从5K Ω 、10K Ω 、20K Ω 、40K Ω 、80K Ω 、160 K Ω 可调
- 设备可以远程电脑控制和本地开关控制。
- 设备可以显示加载的电阻值。

高功率电子负载

高功率电子负载用于模拟动力电池组负载，可模拟各种正常和异常状态。

- 输入电压等级：100-500 V；
- 最大直流电流：60 A；
- 设备可以远程电脑控制和本地开关控制。

BMS供电电源

BMS供电电源可选择开放测试系统平台的电源供电板卡供电或采用外置数控电源。(根据测试需求与R&S开放测试系统平台的板卡配置而定)

- 为管理系统提供电源；
- 电压在0-50 V可调；
- 并可完成过压、欠压试验；
- 具备可控掉地功能。

绝缘电阻测试仪

绝缘电阻测试仪技术指标：

- 输出电压可以在1 V分辨率下任意设定-25 V~1000 Vdc (输出特性符合JIS C 1302-1994)。此外，还具有窗口比较器、计时器功能，可有效进行基于各类安全标准的绝缘电阻试验。除此之外，其上还标准安装有可从外部调用的面板存储器、SIGNAL I/O连接器和RS-232C接口。

- 输出电压设定范围：-25 V~1000 Vdc (符合JIS C 1302-1994的输出特性)
- 电阻测量范围：0.01 M Ω ~5000 M Ω
- 搭载放电功能
- 搭载有窗口比较器
- 保持功能 (在PASS期间保持试验结束时的测量电阻值)
- 搭载有计时器功能
- 后部输出端子
- 测量值监控端子
- 面板搭载有存储器 (10种)
- 搭载有SIGNAL I/O、遥控器端子
- 标准安装有RS-232C接口

绝缘耐压测试仪

绝缘耐压测试仪采用的是在各类安全标准下进行耐压试验的专用测试仪

- 搭载有数字电压计和电流计
- 便于判断运行状态的大显示屏
- 用来设定准确试验时间的数字计时器
- 采用检测断线的窗口比较器方式的判标准
- DC耐压试验后的自动放电功能
- 各类远程控制功能和各类信号输出功能

高精度恒温箱

- 温度范围:-60 $^{\circ}$ C-150 $^{\circ}$ C
- 工作室尺寸 (CM) 宽*深*高 (约) 40 \times 40 \times 50
- 外型尺寸 (CM) 长*宽*高 (约) 60 \times 115 \times 150
- 标称容积 (L): 80 L
- 升温速率： $\geq 3.0^{\circ}$ C/min (非线性) 降温速率： $\geq 1.0^{\circ}$ C/min (非线性)
- 温度波动精度： $\leq \pm 0.5^{\circ}$ C

R&S®BMS测试系统软件设计

R&S®BMS测试系统测试系统平台配置上位机控制软件和数据采集分析软件，控制软件完成各模块参数设置并存储，数据采集分析软件可完成测试数据的采集、记录、分析及自动生成测试报告。在测试设备选型的时候选择能与上位机软件接口和数据交换的设备，并开发上位机实现数据交换和监控，完成相应功能测试、精度校验、数据存储和本地访问。BMS与PC机之间的通讯采用指定的标准协议进行测试，配合功能测试软件，可实现BMS与PC机之间的自动化测试。

状态监测精度测试

利用PC机界面调整温度、电流、单体电压、总电压、绝缘电阻，将标准值与电池管理系统测量得到的参数值（电池管理系统的通过RS232或者CAN总线按照提供的标准协议发送）进行对比，计算电池管理系统的温度、电流、单体电压、总

电压、绝缘电阻测量误差以及误差的最大值、最小值和平均值。并记录测试结果，输出测试报告。测试报告示例如下：

绝缘电阻测试

利用PC机界面设置测试电压值，启动测试按钮，测试管理系统绝缘电阻测试，并记录结果，输出报告。

绝缘耐压测试

利用PC机界面设置测试电压值，启动测试按钮，远程控制实现测试管理系统绝缘耐压性能，并记录结果，输出报告。

通讯功能测试

电池管理系统按照指定的电池管理系统与整车控制器之间的CAN总线协议以及电池管理系统和充电机之间的CAN通讯协议进行软件编程。PC机侧配置上位机测试软件用于模拟整车控制器或者充电机的虚拟终端。测试过程中，将PC机经过CAN总线转换模块与电池管理系统相连，虚拟终端按照约定的协议发出相应的报文，并接收电池管理系统反馈的报文，通过与指定的CAN协议进行比较，验证电池管理系统发送报文的有效性和正确性。

SOC估算精度测试

PC机与程控电流源连接，电池管理系统电流检测传感器与程控电流源输出连接。将电流测试工况曲线（可参考电池管理系统技术要求SOC估算部分的电流曲线进行测试）嵌入PC机模拟软件，实时控制恒流源的输出，电池管理系统依据检测到的恒流源的数据，进行电池的容量估算，并通过CAN总线将容量数据发送至PC机。将电池管理系统估算的容量与按照工况实际计算的电池容量进行比较，判断电池管理系统估算的误差。

BMS管理系统安全保护功能测试，

目的是校验BMS保护动作的可靠性和灵敏度。具体项目如下图：

| 项目 | 报警条件 | 响应情况 |
|--------|------|------|
| 模块温度过高 | | |
| 模块温度过低 | | |
| 单体电压过压 | | |
| 单体电压欠压 | | |
| 温差过大 | | |
| 总电压过压 | | |
| 总电压欠压 | | |
| 充电电流过流 | | |
| 放电电流过流 | | |
| SOC过低 | | |
| 绝缘电阻改变 | | |

测试用例

电池总电压和总电流模拟与精度测试

BMS测试系统对BMS测量电池总电压和总电流的精度测试框图如下图所示，利用高精度高电压恒压源模拟电池组的总电压，由高精度高电流恒流源模拟电池总电压和总电流模拟与精度测试拟电池组总电流，BMS测试系统的PC控制台通过远程控制接口控制高精度电压源的电压变化和高精度电流源的电流变化，通过CAN总线读取相应的BMS系统测量出的电池组总电压和总电流值，将测量结果和设置标准值进行精度对比，测量精度误差。

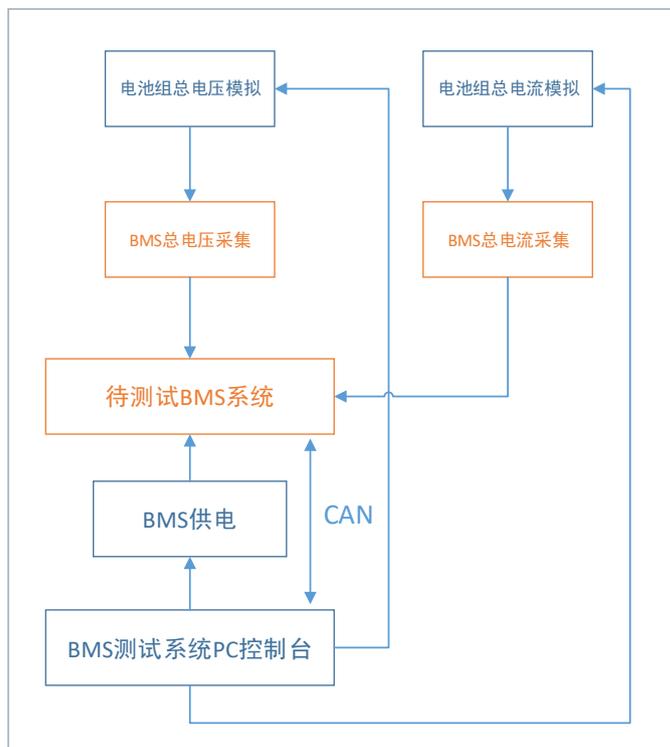


图3 电池总电压和总电流模拟与精度测试

电池单体电压模拟与精度测试

BMS测试系统对BMS测量单体电池电压的精度测试框图如下图所示，BMS测试系统配置有模拟12组单体电池的高精度恒压源，并且具有输出电压的高精度的测试读回功能。因此，可由BMS测试系统的PC控制台发起测试，远程控制单体电池模拟模块的电压变化，将BMS测试值和单体电池模拟模块的电压的实测读回值进行对比，从而测量BMS对于单体电池电压的测试精度。

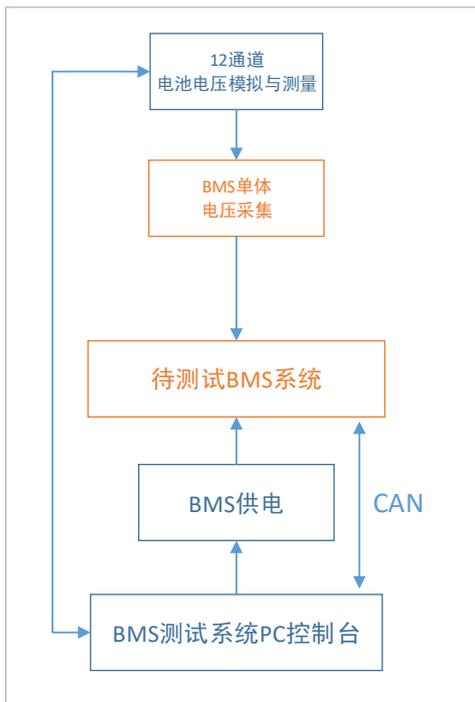


图4 电池单体电压模拟与精度测试

绝缘电阻精度测试

BMS测试系统对BMS测量绝缘电阻的精度测试框图如下图所示，BMS测试系统配置有高压输入高阻值模拟的绝缘电阻模拟模块，该模拟模块具有极高的阻值精度，由BMS测试系统的PC控制台远程控制改变绝缘电阻模拟模块模拟的电阻值。同时PC控制台通过CAN总线读取BMS相应的绝缘电阻实际测量值，进行精度和误差对比。

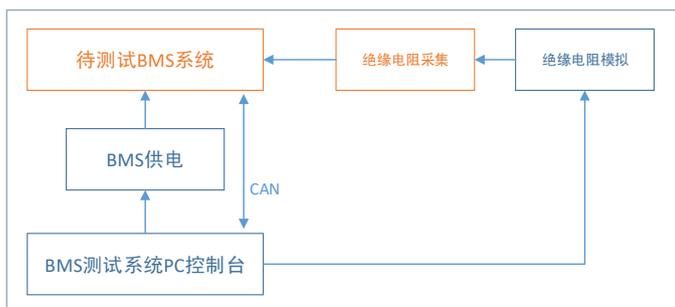


图5 绝缘电阻精度测试

电池组温度管理功能测试

对于BMS管理电池组温度的功能测试框图如下图所示，BMS测试系统配置有用于温度模拟模块可产生相应温度对应的高精度阻值或电压值，BMS内温度采集模块采集此模拟的电阻值或电压值即可得到电池组当前温度值。BMS测试系统的PC控制平台可以远程控制温度模拟模块根据测试温度模拟不同的电阻或电压值，同时，BMS测试系统配置高精度的阻值和电压值测量模块，通过测量值与温度的对应关系换算出对应的温度值。将测量的对应温度值与CAN总线读取的BMS测试温度值进行对比，即可得到BMS测试温度的精度和误差。利用PC控制平台远程控制温度模拟模块模拟超出电池组温度阈值的高温和低温，由CAN总线读取相应报警信息，测试BMS对电池组的温度管理控制功能是否正常实现。

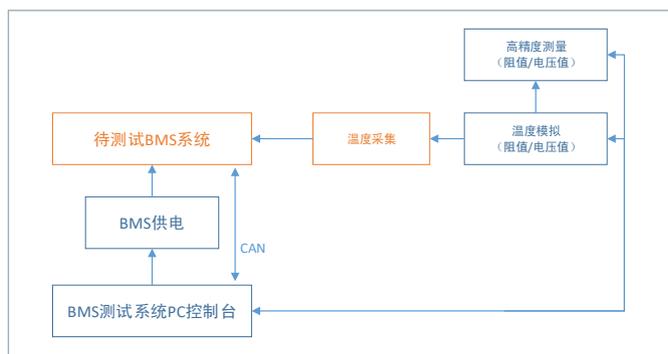


图6 电池组温度管理功能测试

电池组安全控制功能、故障诊断和处理功能测试

BMS测试系统对BMS的电池组安全控制和故障诊断处理的功能测试框图如下图所示，BMS测试系统通过PC控制台发起测试，设置电池组模拟进入各种异常模式，如电池组温度过高或过低、单体电池电压过高或过低、总电压过高或过低、充电电流过流、放电电流过流、SOC过低、绝缘电阻改变等，PC控制台通过CAN总线接口核对BMS输出控制信号的采集判断BMS对于各种故障的诊断告警和处理功能是否正常。

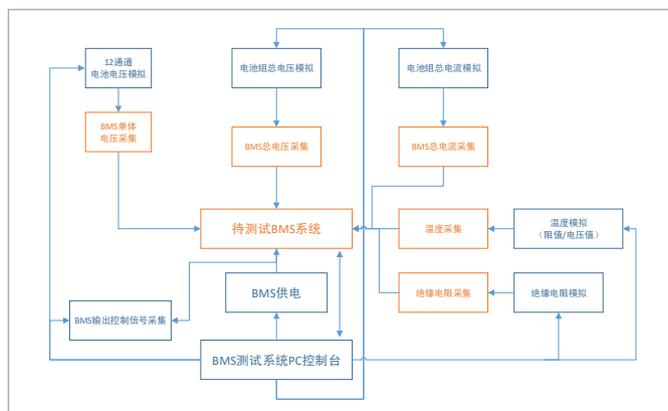


图6 电池组安全控制功能、故障诊断和处理功能测试

电池SOC估算功能测试

BMS测试系统对BMS关于电池SOC估算能力的测试框图如下图所示，BMS测试系统利用PC控制台远程控制高精度高电流输出电流源，通过电流源输出电流的变化模拟计算得到电池组的充放电曲线数据，与BMS测量得到的SOC值进行对比，测试BMS的SOC估算能力，还可以通过软件仿真来检测BMS SOC算法的可靠性，通过软件导入充放电历史数据，改变BMS数据的内容，查看SOC值的估算，验证BMS的SOC估算性能。

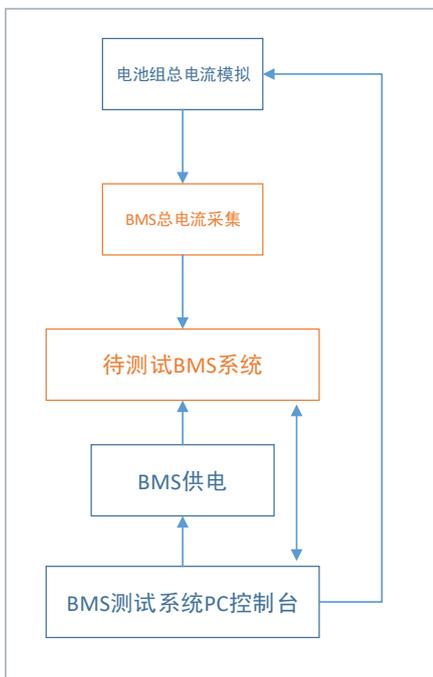


图7 电池SOC估算功能测试

BMS系统的绝缘电阻、绝缘耐压测试

BMS系统作为车载系统的一部分，同样需要进行系统自身的绝缘电阻和绝缘电压测试。对于BMS系统自身的绝缘电阻和绝缘电压测试框图如下图所示。

绝缘电阻测试：在BMS与动力电池相连的带点部件和壳体之间施加500V DC的电压进行绝缘电阻测试。(测试绝缘电阻值不小于2M欧姆)

绝缘耐压测试：

- 在BMS与动力电池相连的带电部件和其壳体之间施加频率为50~60 Hz的正弦波交流电压，测试电压为(2U+1000)(最小为1500 V)，历时1 min。其中U为电池系统的额定电压。
- 在BMS的供电电源正极端子和与其动力电池相连的带电部件之间施加频率为50~60 Hz的正弦波交流电压，测试电

压为(2U+1000)(最小为1500 V)，历时1 min。

- 在BMS的通信线路和与其动力电池相连的带电部件之间施加频率为50~60 Hz的正弦波交流电压，测试电压为(2U+1000)(最小为1500 V)，历时1 min。
- 要求在测试过程中无击穿或闪络等破坏性放电现象。

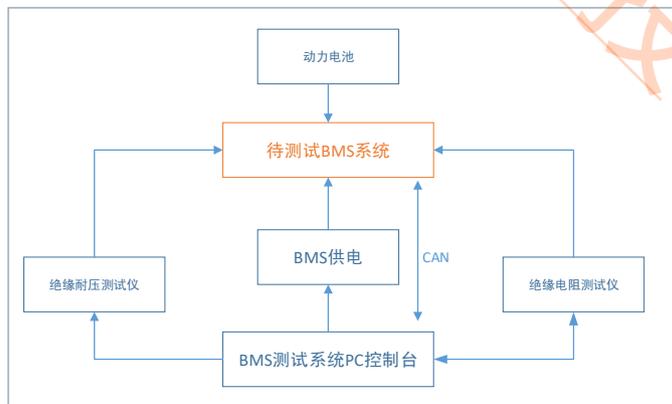


图8 BMS系统绝缘电阻、绝缘耐压测试

BMS系统的过压和欠压运行测试

BMS系统对BMS的过压和欠压运行测试的框图如下图所示。测试需要模拟BMS正常工作状态，可通过BMS测试系统的PC控制台控制单体电池电压模拟模块、电池组总电压模拟模块、电池组总电流模拟模块、温度模拟模块和绝缘电阻模拟模块进行各种模拟状态条件组合。假设测试BMS系统的电源电压为15 V或30 V。

- 过电压测试：**将供电电源电压调至16 V或32 V，在该供电电压下持续运行1小时，测试过程中记录BMS状态参数测量值，并进行误差比较；
- 欠电压测试：**将供电电源电压调至9 V或18 V，在该供电电压下持续运行1小时，测试过程中记录BMS状态参数测量值，并进行误差比较。

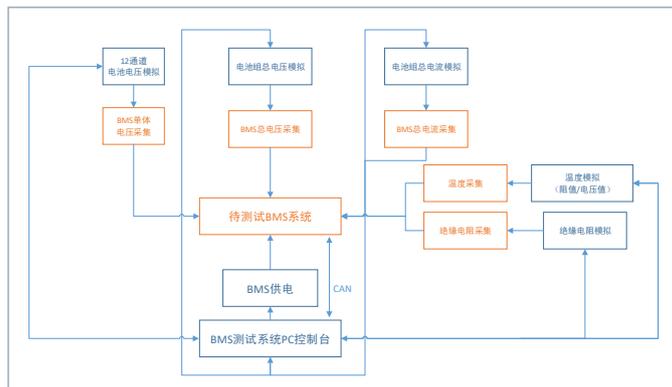


图9 BMS系统过压和欠压运行测试

BMS系统的高低温测试

对于BMS系统的高低温测试框图如下图所示，需要测试BMS系统对于外界环境因素如对温度过高和过低的反应。将待测BMS系统装入高精度恒温箱，模拟BMS正常工作各种状态，改变恒温箱的温度，观测BMS系统的正常工作的高低温阈值，以及BMS系统对于环境温度过高或环境温度过低时的报警和异常处理功能是否正常。

- 高温运行：将BMS放入初始温度为室温的高温箱中，使其处于工作状态，达到 $65^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 后保持1小时，测试过程中记录BMS状态参数测量值，并进行误差比较。
- 低温运行：将BMS放入初始温度为室温的温箱中，使其处于工作状态，达到 $-25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 后保持1小时，测试过程中记录BMS状态参数测量值，并进行误差比较。
- 耐高温性能：将BMS放入初始温度为室温的温箱中，使其处于工作状态，达到 $85^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 后保持4小时，恢复到室温后，记录BMS状态参数测量值，并进行误差比较。
- 耐低温性能：将BMS放入初始温度为室温的温箱中，使其处于工作状态，达到 $-40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 后保持4小时，恢复到室温后，记录BMS状态参数测量值，并进行误差比较。
- 耐温度变化性能：按照BMS测试规范要求，在 $-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$ 之间进行温度切换，在每一种温度中的放置时间为2小时，温度转换时间为20~30秒，循环次数为5次。BMS系统在不同状态下进行测试，恢复到室温后，记录BMS状态参数测量值，并进行误差比较。

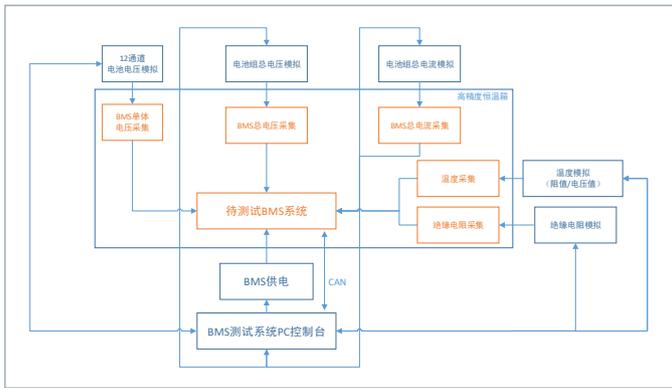


图10 BMS系统高低温测试

系统间通信功能测试

BMS测试系统对BMS与车内系统的通信功能测试框图如下图所示，BMS测试系统对BMS和整车控制器之间的CAN总线协议以及BMS和充电机之间的CAN通讯协议进行软件编程模拟。PC机侧配置上位机测试软件用于模拟整车控制器或者充电机的虚拟终端。测试过程中，将PC机经过CAN总线转换模块与BMS相连，虚拟终端按照约定的协议发出相应的报文，并接收BMS反馈的报文，通过与指定的CAN协议进行比较，验证BMS发送报文的有效性和正确性。

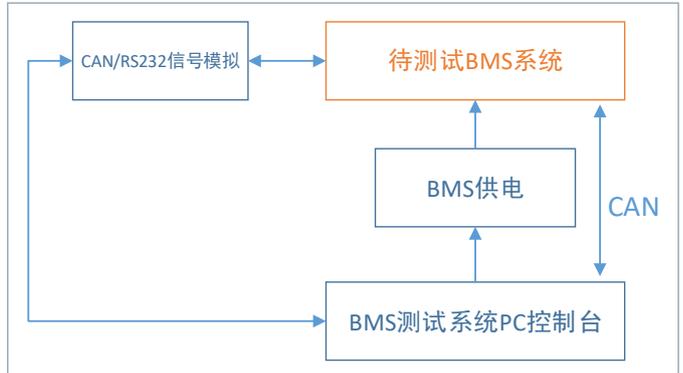


图11 系统间通信功能测试

电池充放电控制功能测试

对于BMS控制电池充放电功能的测试框图如下图所示，由BMS测试系统的PC控制台通过CAN总线接口模拟BMS发送充电或放电指令，读取BMS对于单体电池电压和电流测量值，与BMS测试系统测试的单体电压和电流值进行对比，同时通过BMS的总电压和总电流及SOC测试观测BMS对于电池的充放电状态的控制是否符合模拟场景。

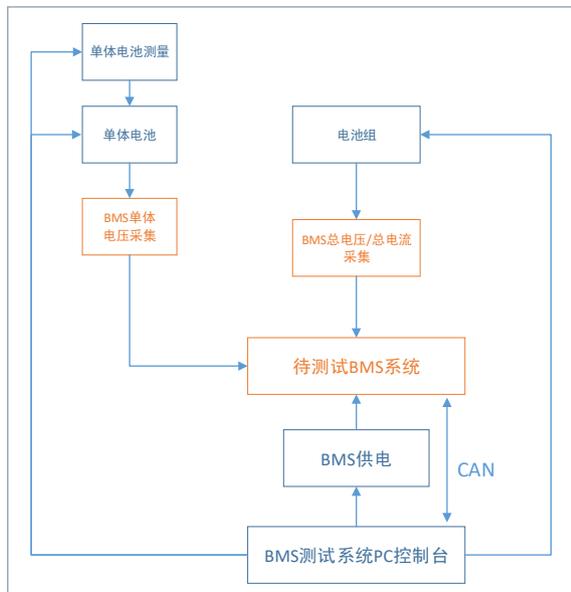


图12 电池充放电功能测试

开关量参数模拟测试

对于BMS开关量参数的模拟测试，其测试框图如下图所示，BMS测试系统模拟各种继电器通断组合和模拟测试信号输入，在BMS的输出接口对控制信号、告警信号进行采集和分析，从而实时检测BMS对于各种工作状态的报警控制情况，检测BMS开关控制能力和负荷能力等。

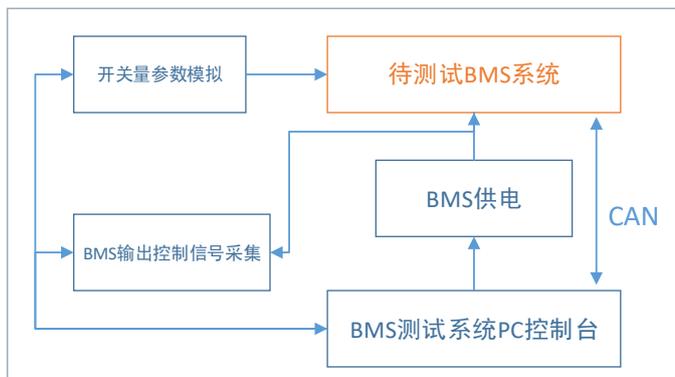


图13 开关量参数模拟测试

系统配置

根据BMS测试系统结构框图，其基本配置如下：

- Test Software：测试软件，根据需求完成所需的测试项目，实现自动化测试；
- R&S TSVP：用于BMS系统的模拟单体电池、温度模拟、高精度电阻/电压测量以及开关量参数模块模拟和实现BMS输出控制信号的采集等测试相关项目；
- 高精度恒流源/高精度恒压源：用高精度高电流恒流源和高精度高电压恒压源模拟电池组总电压和电池组总电流；
- 高功率电子负载：用于绝缘电阻精度测试，通过改变电阻值，测试BMS绝缘电阻的测试精度和系统绝缘改变时BMS的响应；
- 高精度恒温箱：测试BMS高温运行、低温运行、耐高温性能、耐低温性能和耐温度变化性能；
- 绝缘电阻测试仪：测试BMS的绝缘电阻；
- 绝缘耐压测试仪：测试BMS的绝缘耐压；
- CAN通讯转换模块：实现PC和BMS系统的信息交互，模拟BMS系统与车内系统信息交互；
- 可编程数控电源(根据具体配置可选)：用于BMS的供电及BMS的过压与欠压测试；
- 示波器(可选)：用于BMS测试系统所需的相关异常情况时域测试与问题定位；
- Other：其他，用于BMS测试系统搭建所需的电脑显示器、键盘、鼠标、控制台、电缆、接头，测试探头、单体电池与电池组或其他所需配件。

| 测试用例/ 所需仪表 | 开放测试 系统平台 | 高精度电 压源 | 高精度电 流源 | 高功率电 子负载 | 绝缘电阻 测试仪 | 绝缘耐压 测试仪 | CAN通讯 转换模块 | 高精度恒 温箱 | 可编程数 控电源 |
|-----------------------------------|--------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|---------------|------------|-------------|
| 电池总电压和 总电流模拟与 精度测试 | ✓ | ✓ | ✓ | | | | ✓ | | ✓ |
| 电池单体电压 模拟与精度测 试 | ✓ | | | | | | ✓ | | ✓ |
| 绝缘电阻精度 测试 | ✓ | | | ✓ | | | ✓ | | ✓ |
| 电池组温度管 理功能测试 | ✓ | | | | | | ✓ | | ✓ |
| 电池组安全控 制功能、故障 诊断和处理功 能测试 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ |
| 电池SOC估算 功能测试 | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | | ✓ |
| BMS系统的 绝缘电阻、绝 缘耐压测试 | ✓ | | | | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ |
| BMS系统的 过压和欠压测 试 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ |
| BMS系统的 高低温测试 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ | ✓ |
| 系统间通信功 能测试 | ✓ | | | | | | ✓ | | ✓ |
| 电池充放电控 制功能测试 | ✓ | | | | | | ✓ | | ✓ |
| 开关量参数模 拟测试 | ✓ | | | | | | ✓ | | ✓ |

视频生成与分析大平台

从传统的电视机到智能手机，再到方兴未艾的虚拟现实和智能汽车，与视频相关的产品和应用已经与人们的日常生活密不可分。R&S®VTx/DVSG/BTC产品提供了一系列针对屏幕显示质量测试、视频播放器测试、数字和模拟音视频接口测试，以及电视接收测试的解决方案。

一 屏幕显示质量测试平台

R&S®DVSG作为音视频信号源，搭配第三方的光分频谱仪(如Konica Minolta CS-2000)，可以测量屏幕的亮度、色度、对比度和视角等基本参数。R&S®DVSG通过HDMI接口输出测试信号给屏幕。R&S®DVSG上可安装Konica Minolta CS-S10w软件对测量结果进行数据处理，并通过USB接口进行仪表的控制和数据的传输。



图1-1: 屏幕显示测试设置

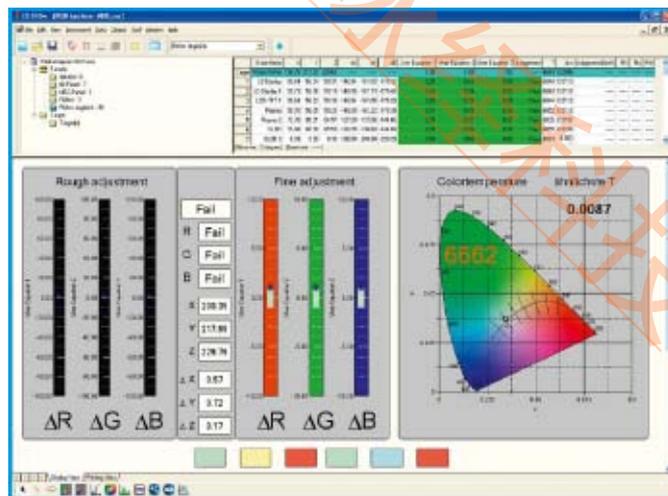


图1-2: Konica Minolta CS-S10w软件的色温测试结果实例

R&S®DVSG-K10音视频信号源可以输出非压缩、高精度的音视频信号。测试信号的所有图像和音频信息比特由RAM直接加载至数字处理单元，经处理后再由AV输出。R&S®DVSG通过纯数字方式实现，具备极高的精度和品质，保证待测显示单元的评估质量。

R&S®DVSG自带丰富的测试信号库，最高支持1080P的分辨率。多运动测试序列可用于对动态模糊、去隔行、过驱动和胶片探测等进行重复检测。通用测试模板包含了特殊的测试行以及运动元素，可用于诸如EMC、唇同步和VITS等测量应用。另外，测试信号库还提供了符合TECH325规范的EBU测试模板，以及用于主观图像质量评价的自然场景测试图。

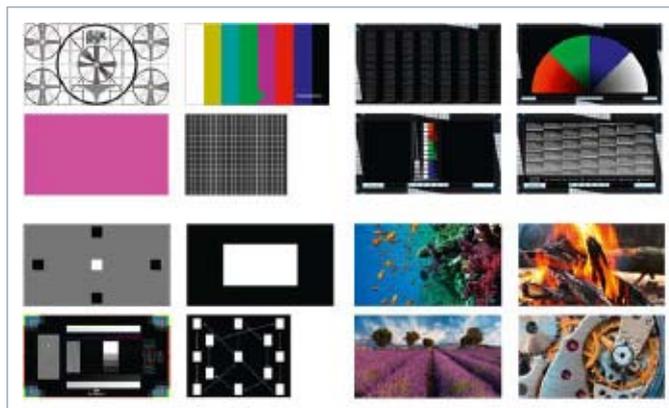


图1-3: 测试信号库实例

R&S®DVSG-K20码流播放器和记录器可以播放和录制MPEG2 TS流，输出压缩的实时信号。

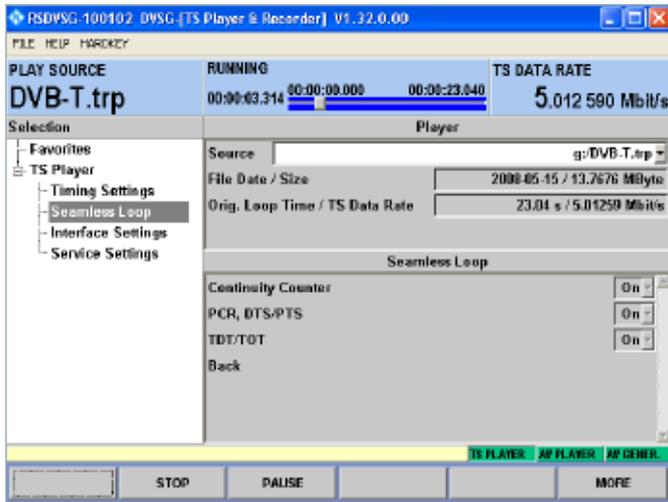


图1-4: TS Player&Recorder

不仅仅是HDMI接口，R&S®DVSG提供了丰富的模拟/数字音视频输出接口，满足不同的接口需求。



图1-5: R&S®DVSG的音视频接口

二 HDMI接口测试平台

R&S®VTx平台主要提供了HDMI接口测试、MHL接口测试、模拟视频接口测试和增强型音视频分析等功能。

R&S®VTx采用模块化设计，用户可根据测试需求选购不同的测试模块。其中，R&S®VTC支持最多8个测试模块，配备11.6英寸触摸屏，是适用于消费电子产品音视频接口测试的高端平台；R&S®VTE支持最多3个测试模块，配备7英寸触摸屏，是适用于质检和测试系统集成中的音视频接口测试的紧凑型平台；R&S®VTS包含1个测试模块，通过远程控制和操作，是适用于设备制造领域的经济型平台。



图2-1: R&S®VTx系列

R&S®VT-B2363模块支持HDMI接口的源端和接收端的测试，符合HDMI 2.0标准，支持HDCP 1.4和2.2，支持4k超高清视频信号。

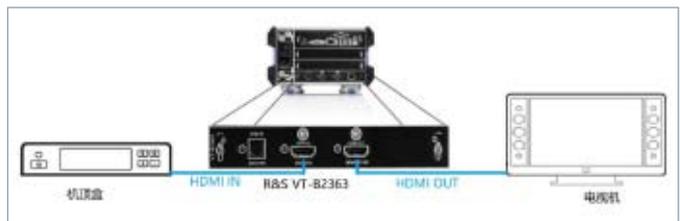


图2-2: R&S®VT-B2363模块支持HDMI的源端和接收端测试

R&S®VT-K364 HDMI发生选件支持HDMI信号生成，包括以下功能：

- 测试接收端对非支持格式的响应
- 测试接收端对错误指令的响应
- 热拔插检测
- HDCP开/关
- 显示和保存接收端的EDID数据
- 可配置的像素位移和行位移功能
- 可配置的视频幅度
- ARC音频信号分析
- 丰富的静态图像库
- 高达4K分辨率的视频格式
- 8声道PCM正弦音调发生器

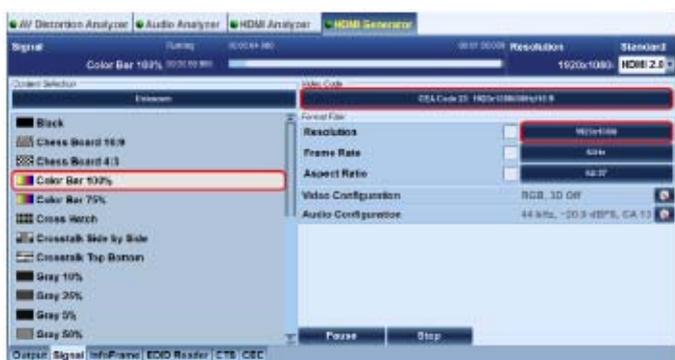


图2-3: HDMI发生器：选择测试图和格式

R&S®VT-K2364 HDMI接收选件可进行信号分析，包括以下功能：

- 模拟接收端能力的EDID库
- HDCP解扰
- 音视频输出
- 音视频内容分析
 - 显示相关协议参数
 - 视频时间周期参数
 - 高带宽数字内容保护 (HDCP) 状态和使用的密钥
 - 辅助视频信息帧，音频信息帧，HDMI特定供应商信息帧，HDMI论坛特点供应商信息帧，动态范围和控制信息帧，源产品描述和MPEG信息帧
 - 状态和控制数据通道 (SCDC) 状态

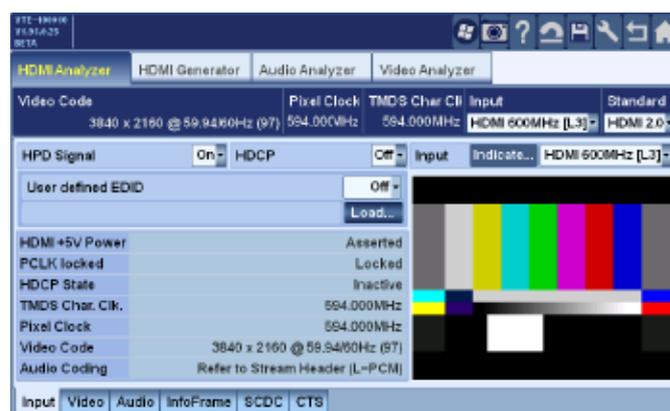


图2-5: HDMI分析：显示视频信号和基本接口数据

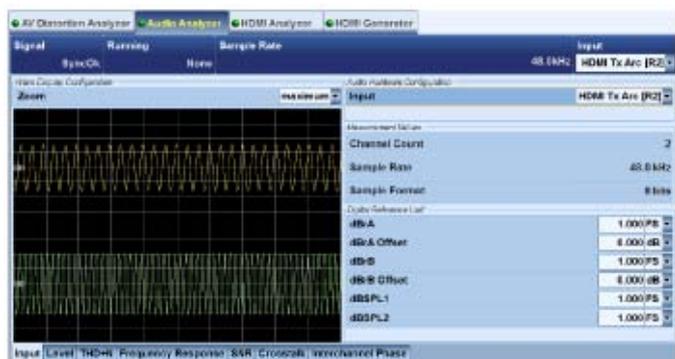


图2-4: ARC音频信号分析

罗德与施瓦茨公司是HDMI论坛的活跃成员，不断增加和审批新的一致性测试规范 (CTS) 测试。CTS测试的执行简单而高效，只需按下按钮即启动测试。搭配R&S®AVBrun Sequencer选件可通过专用软件实现自动测试。



图2-6: 按下按钮即启动CTS测试

三 模拟音视频接口测试平台

R&S®VT-B2370模块可以进行模拟音视频信号分析，同时支持复合视频信号 (Composite) 和分量视频信号 (YPbPr/RGB/RGBHV)，以及双通道音频信号。



图3-1: R&S®VT-B2370选项

模拟音视频信号分析选件中可以显示信号波形，对测量项目进行设置并显示测量结果。



图3-2: 音视频信号的波形



图3-3: 音视频信号的测量设置和测量结果

模拟音视频信号分析包括了以下测量功能:

- ▮ 幅度和延迟测试
 - 亮度条幅度
 - 同步脉冲幅度
 - 彩色条幅度
 - 通道间幅度
 - 通道间延迟
- ▮ 线性失真
 - 2T脉冲波
 - 短时间失真
- ▮ 非线性失真
- ▮ 频率响应
 - SIN X/X幅度和延迟
 - 多波群
 - 扫描幅度
- ▮ 噪声测量
 - 未加权信噪比
 - 亮度加权信噪比
- ▮ 定时
 - 场周期和场频率
 - 行周期和行频率
 - 亮度条持续时间
- ▮ 抖动
 - 行抖动正峰值、负峰值、峰峰值
 - 行抖动标准差

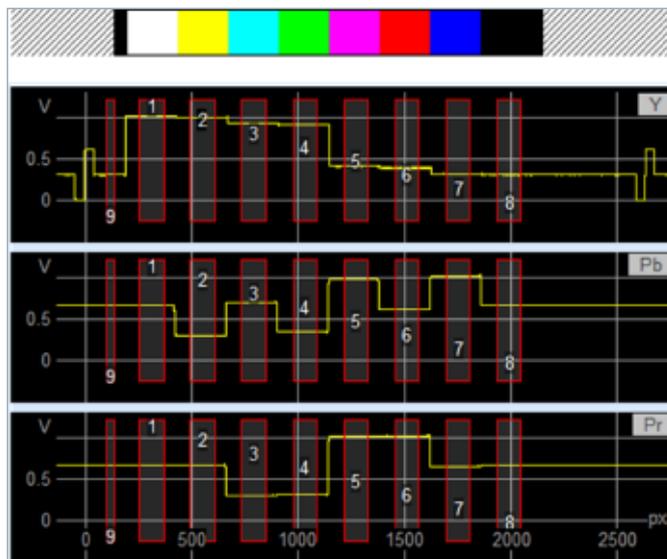


图3-4: 用于测量YPbPr信号彩色条幅度的测试信号

四 音视频失真分析测试平台

R&S®VT-K2111选件通过识别被测音视频信号与参考信号之间的不同来实时地分析音视频信号的失真。在开始测量前，通过测试接口纪录和保持参考信号。该选件实时地显示被测量的视频信号、参考信号和差值信号，并通过详细的数值和图像分析，显示PSNR、SSIM和MOS值结果。强大的触发功能还能让测试人员观测到各种图像错误（如图像错误点）。对于音频信号，可以测量音频的差值信号、损耗以及电平偏离。

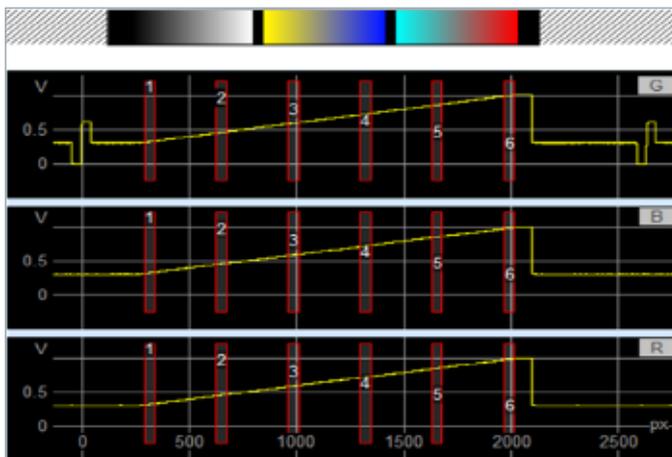


图3-5: 用于测量RGB信号非线性失真的斜坡测试信号



图3-6: RGB信号的同步脉冲测量



图4-1: 音视频失真分析

五 车载影音娱乐测试平台

R&S®BTC是一款针对音视频应用领域支持分析功能及自动测试的信号发生器平台，可同时支持车载音视频分析、车载广播电视接收测试、车载音视频接口（数字/模拟）等测试。

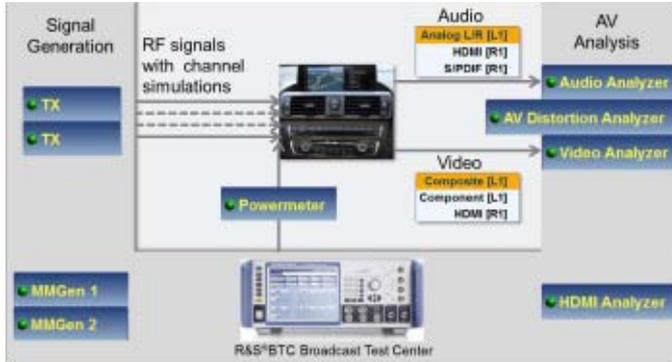


图5-1: R&S®BTC单机实现多项测试

R&S®BTC采用模块化的可扩展设计，在满足不同用户的应用需求的同时，提供了最优化的成本，可以替代以前需要多台测试设备构成的测试平台。只需安装相应R&S®VT模块扩展板和选件，R&S®BTC就能实现与R&S®VTx系列相同的音视频信号分析、数字/模拟接口测试等功能。通过R&S®AVBrun Sequencer软件，R&S®BTC可以支持完整的DUT自动化测试。



图5-2: R&S®BTC可扩展R&S®VT模块

R&S®BTC基于高性能的FPGA设计，实现全球所有广播电视标准的支持，例如AM/FM RDS, DAB, DVB-T/T2, J83, ATSC, DTMB等，并能通过ARB模块播放任意的IQ波形文件。作为一款高端的广播电视信号源，R&S®BTC提供了低至-135 dBc (1 Hz) 的SSB相位噪声。I/Q调整带宽达到160 MHz，输出功率电平可达+18 dBm。

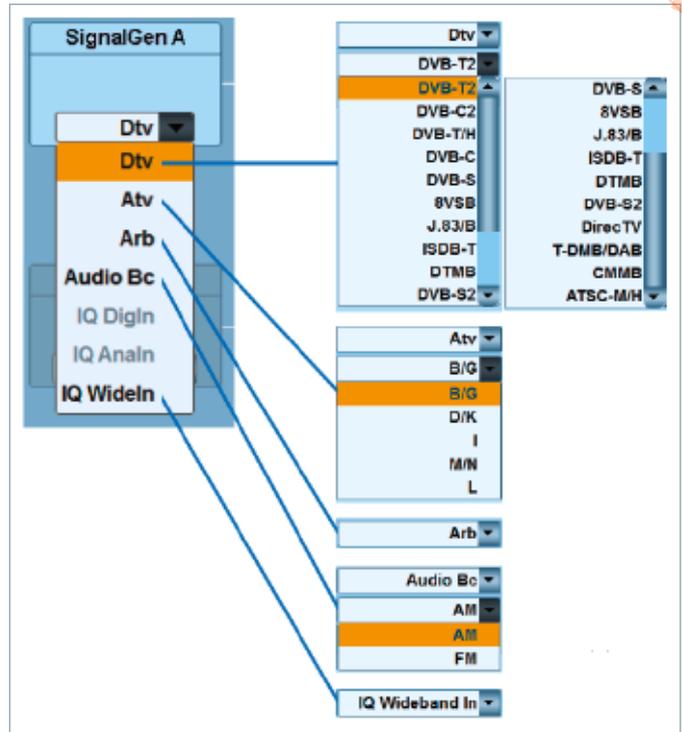


图5-3: R&S®BTC支持全球几乎广播电视标准

车载影音娱乐平台在接收广播电视信号的同时，会收到3G、LTE等其他无线通信信号的干扰。为了测试在干扰条件下的接收性能，R&S®BTC支持在发送所需广播电视信号的同时，通过ARB模块叠加最多8个不同标准的干扰信号。

| Generator | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| State | On | On | On | On | On | On | On |
| Usage | Interferer | Interferer | Interferer | Interferer | Interferer | Interferer | Interferer |
| Waveform | FM_SMALL_750KHz | HD_FM1280c | DRM_12dBFS | DAB_351 | DVB_T2_SF12 | ISDB-TSB_3SEG | LTE_UF_10MHz |
| Required Option | WV-K316 | WV-K354 | WV-K303 | WV-K351 | WV-K303 | WV-K1114 | |
| Sample Rate | 0.891 | 4.424 | 16.981 | 1.573 | 59.605 | 3.750 | |
| Sample Rate (MHz) | 1.099 000 | 9.744 188 | 9.024 999 | 4.099 999 | 11.428 679 | 18.253 970 | 18.66 |
| Sequence Out. # | 0.991 | 9.944 | 449.200 | 0.364 | 8.207 | 0.221 | |
| Attenuation (dB) | 18.00 | 16.99 | 10.99 | 13.99 | -3.99 | 14.00 | |
| Freq. Offset (MHz) | -99.000 999 0 | -40.998 000 0 | -30.998 000 0 | -16.999 000 0 | 16.999 000 0 | 30.000 000 0 | 40.999 |

图5-4: R&S®BTC支持高达8个不同标准的干扰信号



增值服务

- 丨 遍及全球
- 丨 立足本地个性化
- 丨 可定制而且非常灵活
- 丨 质量过硬
- 丨 长期保障

关于罗德与施瓦茨公司

罗德与施瓦茨公司是一家致力于电子行业，独立而活跃的国际性公司，在测试及测量、广播电视与媒体、安全通信、网络安全、监测与网络测试等领域是全球主要的方案解决供应商。自成立80多年来，罗德与施瓦茨公司业务遍布全球，在超过70个国家设立了专业的服务网络。公司总部在德国慕尼黑。

罗德与施瓦茨(中国)科技有限公司

800-810-8228 400-650-5896
customersupport.china@rohde-schwarz.com
www.rohde-schwarz.com.cn
罗德与施瓦茨公司官方微信



北京

北京市朝阳区紫月路18号院1号楼(朝来高科技产业园)
罗德与施瓦茨办公楼 100012
电话: +86-10-64312828 传真: +86-10-64379888

上海

上海市浦东新区张江高科技园区盛夏路399号
亚芯科技园11号楼 201210
电话: +86-21-63750018 传真: +86-21-63759170

广州

广州市天河北路233号 中信广场3705室 510620
电话: +86-20-87554758 传真: +86-20-87554759

成都

成都市高新区天府大道 天府软件园A4号楼南一层 610041
电话: +86-28-85195190 传真: +86-28-85194550

西安

西安市高新区锦业一路56号 研祥城市广场5楼502室
邮政编码: 710065
电话: +86-29-87415377 传真: +86-29-87206500

深圳

深圳市南山区高新南一道013号 赋安科技大厦B座1-2楼 518057
电话: +86-755-82031198 传真: +86-755-82033070