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。

— 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。测试仪表作为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。

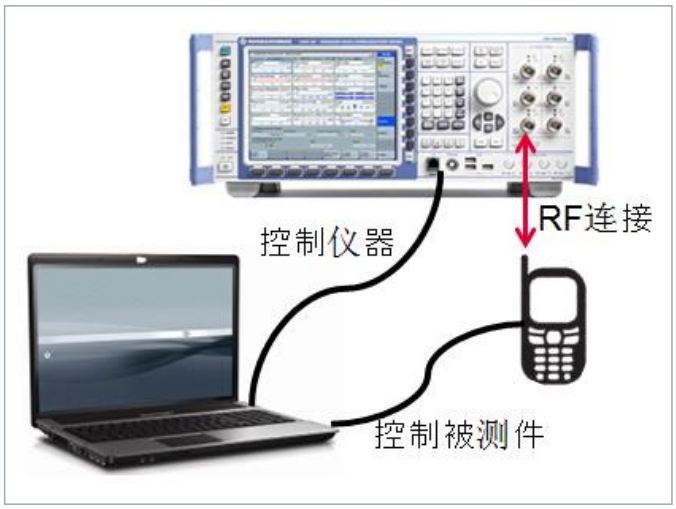


图2：非信令测试环境

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。

定购信息

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：

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。

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。

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，氧吸严重，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。

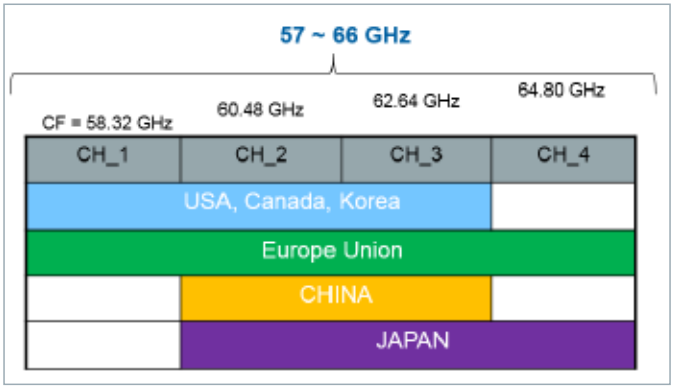


图 1 全球WLAN 802.11ad频率分配

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	π/2 DBPSK	27.5 Mbps
Single carrier(SC) PHY	1...12	π/2 DBPSK π/2 QPSK π/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	π/2 DBPSK π/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。

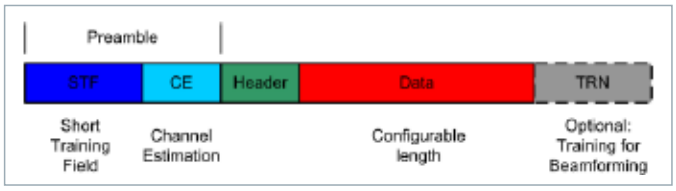


图2 802.11ad帧结构示意图

- 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。

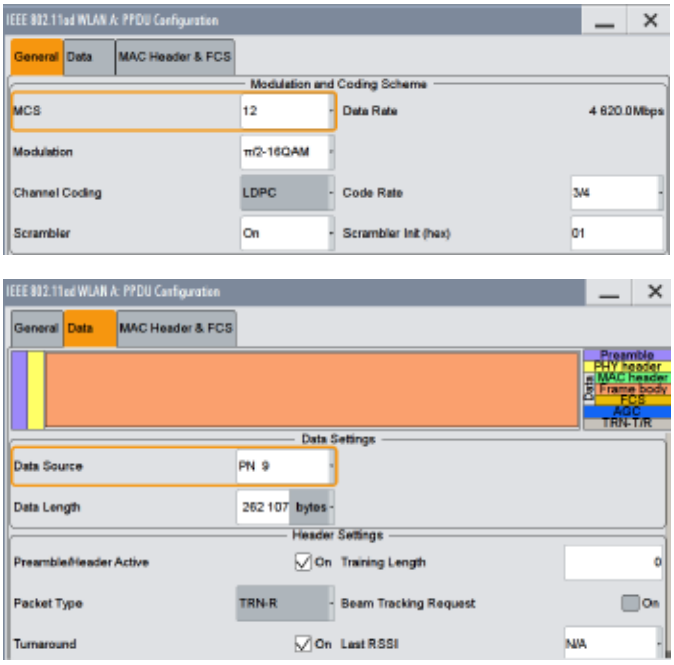


图4 SMW200A的11ad信号产生设置界面

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。

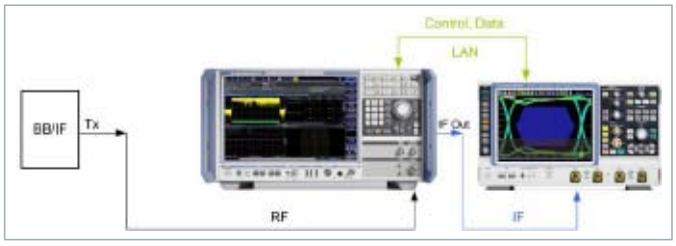


图5 FSW67 + RTO2044分析802.11ad中频信号

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毫米波频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，毫米波频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20log (60/5.9) 约20 dB。因此，在毫米波频段要实现无线传输，不仅考验设备的相噪水平，对测试测量仪表也是挑战。

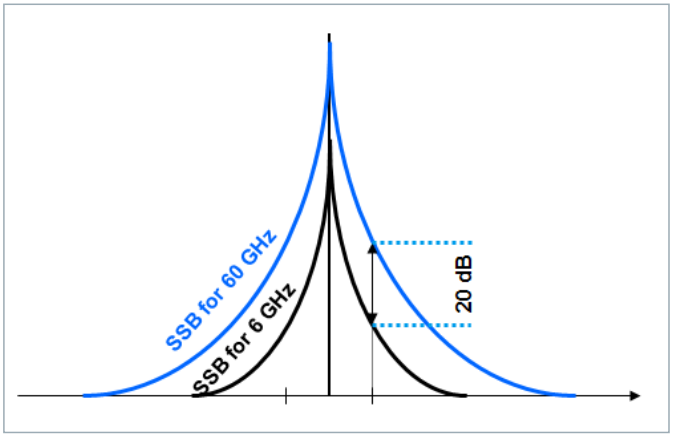


图6 频综10倍频后相噪变化曲线

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 OCXO 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	10 MHz
100 MHz	–90	–110	–125	–137	–143	–144	–151,5	–158
500 MHz	–77	–97	–118	–135	–141	–142	–150,5	–157
1 GHz	–71	–91	–112	–130	–138	–140	–149,5	–156
2 GHz	–65	–85	–104	–123	–130	–130	–145	–158
10 GHz	–51	–71	–94	–117	–128	–129	–144	–156
25 GHz	–43	–63	–86	–109	–120	–122	–136	–148
40 GHz	–39	–59	–82	–105	–116	–118	–130	–142
60 GHz	–35	–55	–78	–101	–112	–114	–128	–140

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。

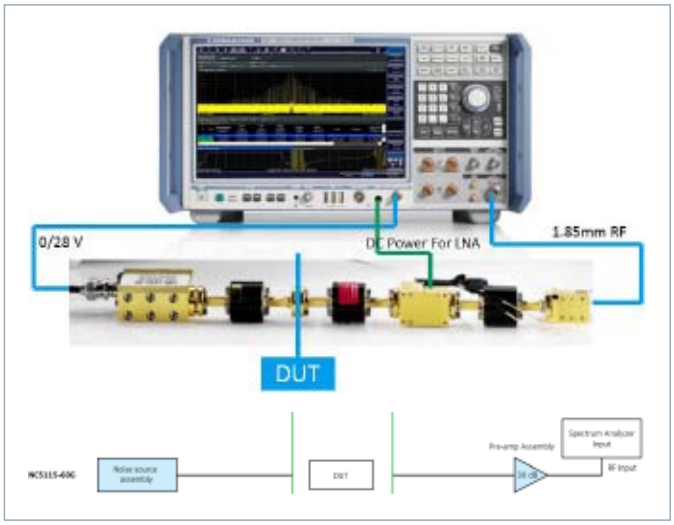


图8 FSW67的60 GHz噪声系数测试

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。

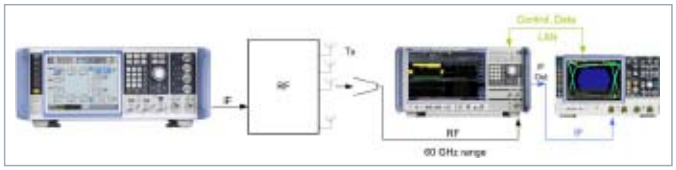


图10 RFIC TX部分测试框图

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信号时具备低达-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。

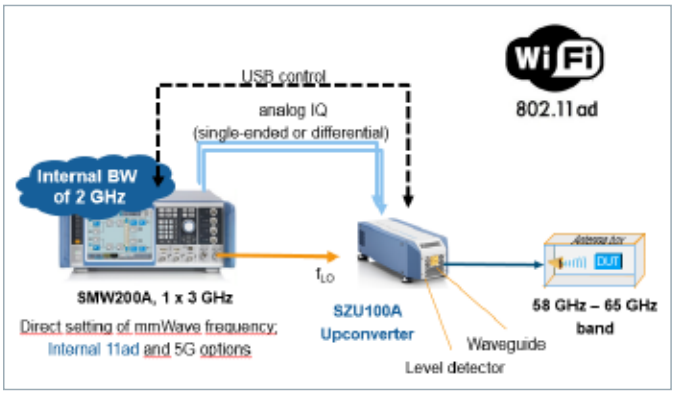


图11 SMW和SZU连接图

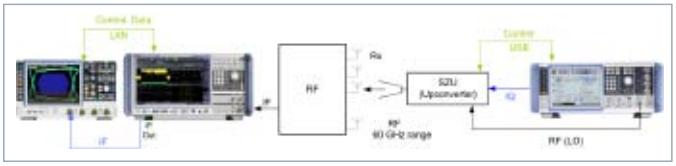


图12 RFIC的RX部分测试框图

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
SC PHY	1	-6	-68
	2	-7	-66
	3	-9	-64
	4	-10	-64
	5	-12	-62
	6	-11	-63
	7	-12	-62
	8	-13	-61
	9	-15	-59
	10	-19	-55
	11	-20	-54
	12	-21	-53

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

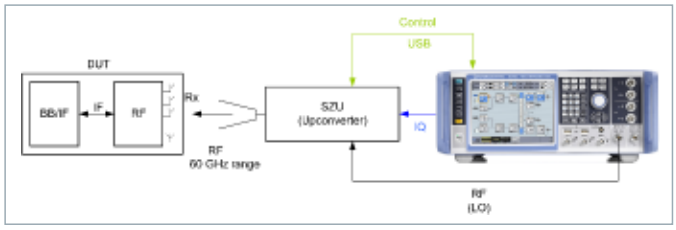


图13 终端接收指标测试

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。

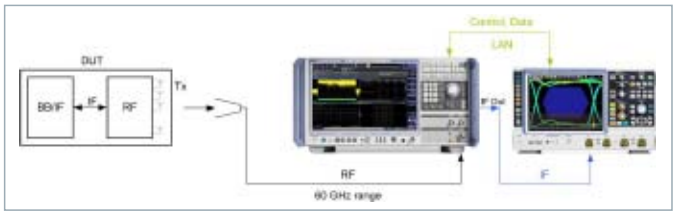


图14 设备发射指标测试

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。

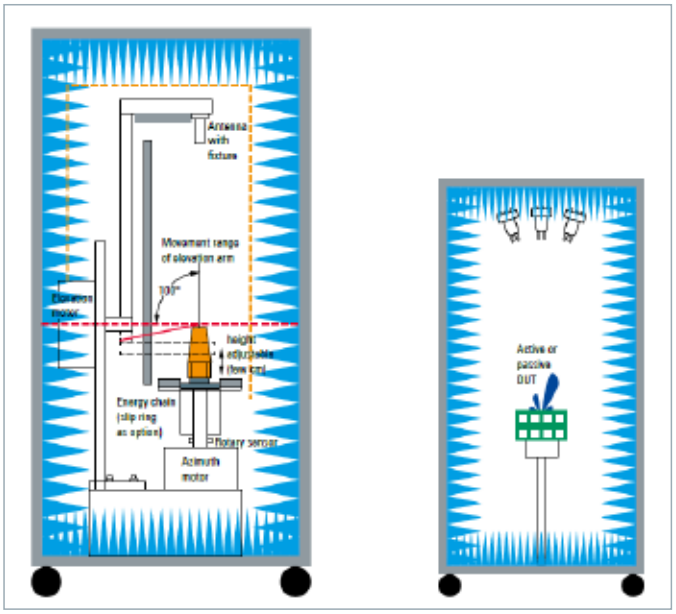


图15 暗室ATS1000的两种OTA测试场景

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。

定购信息

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/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
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。

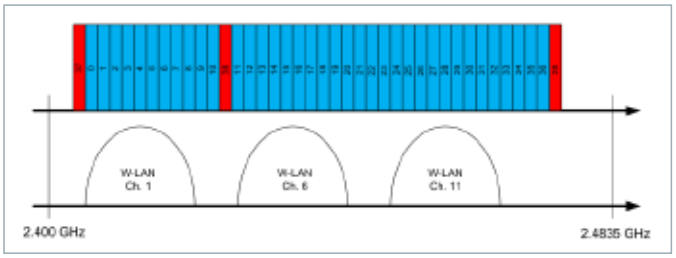


图1：蓝牙低功耗的信道分布

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。

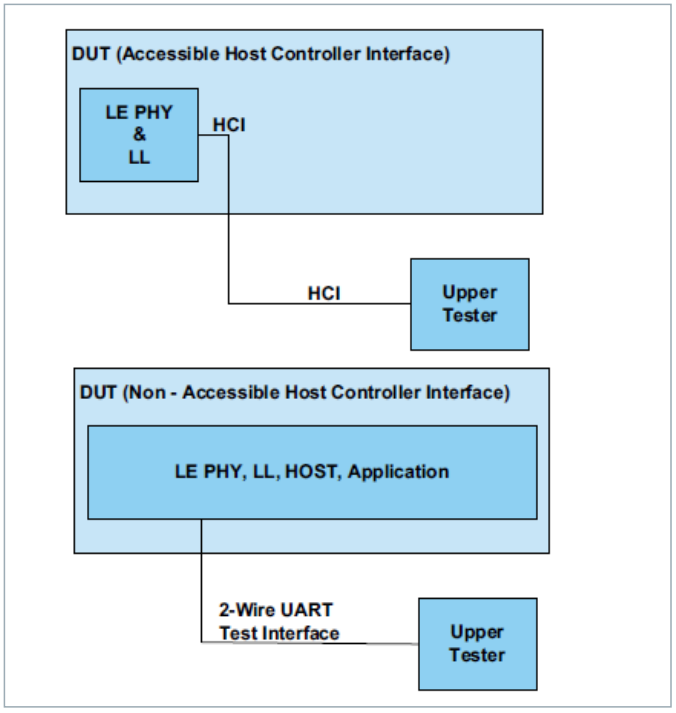


图2：direct test mode架构图

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。

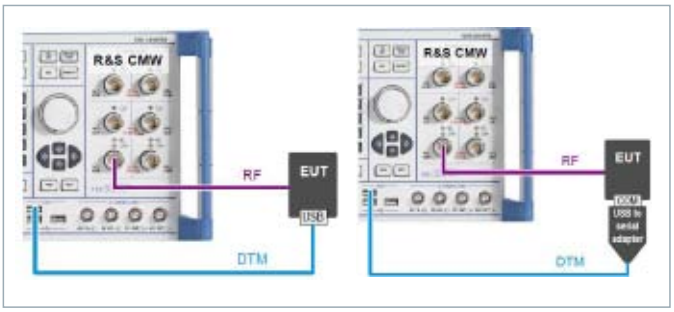


图4：低功耗蓝牙设备与测试仪表的连接图

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。

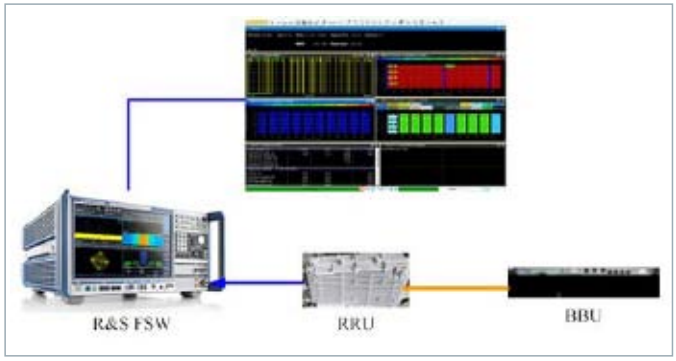
三 NB IoT和eMTC测试平台

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。

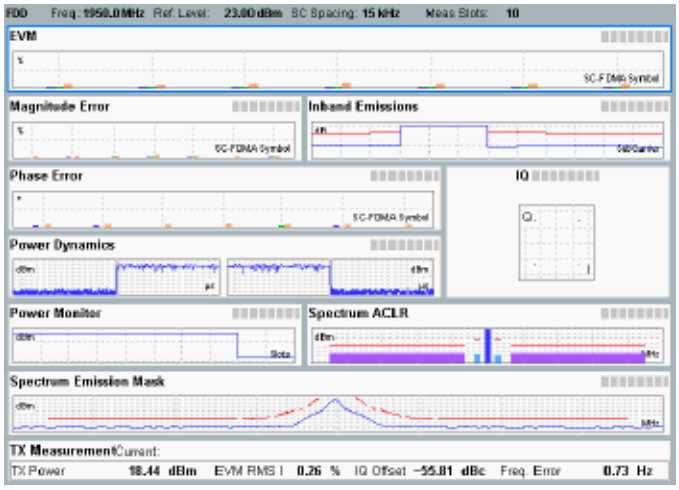
针对外场的基站维护，R&S也提供了专业的测试方案。手持式频谱分析仪FSH可以对各种蜂窝信号进行解调，并且具备干扰查找和地图定位功能；天馈线测试仪ZVH可用于天馈线故障定位、器件测试等需求。

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

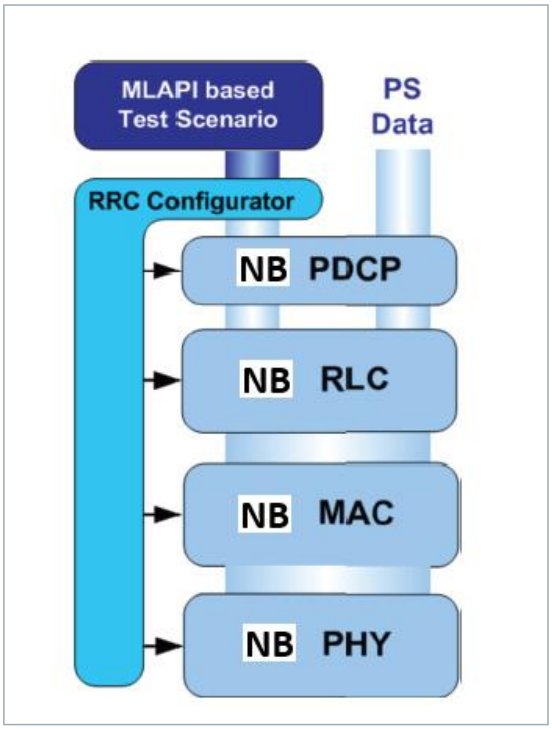
随着通信技术的快速发展，网络之间的互联互通以及通信业务越来越依赖通信协议的发展。可以说，通信系统的正常运行和通信业务的顺利开展，首先就是取决于协议软件是否满足协议规范的要求，所以必须进行协议测试加以保证。协议测试的目的就是保证通信协议正确实现以及确保不同的通信设备之间可以互通互联。在通信测试中，协议测试仅仅是一种黑盒测试，它并不检查协议代码，而是按照协议标准，通过控制观察被测协议实现的外部行为对其进行评价。

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。

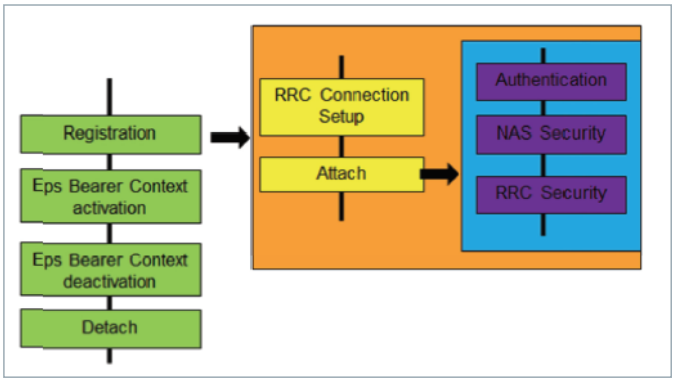
MLAPI测试场景利用CMW500中RRC层的一个服务接入点来进行信令测试，如下图所示，这个接入点主要进行空口端到端消息的传输交换。RRC配置器自动配置底层的协议层，并且保证在NB-IoT/eMTC被测终端和网络侧之间交互信令消息的一致性。



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。

定购信息

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。

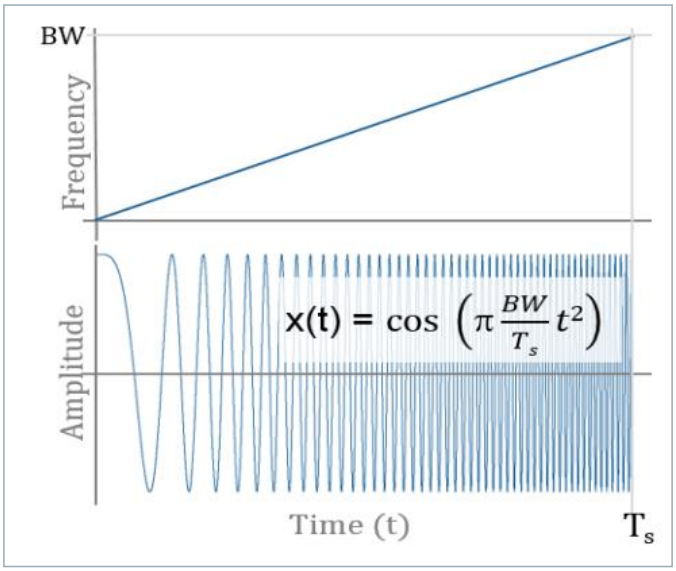


图1 一个线性调频脉冲内上升斜率信号示意

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。

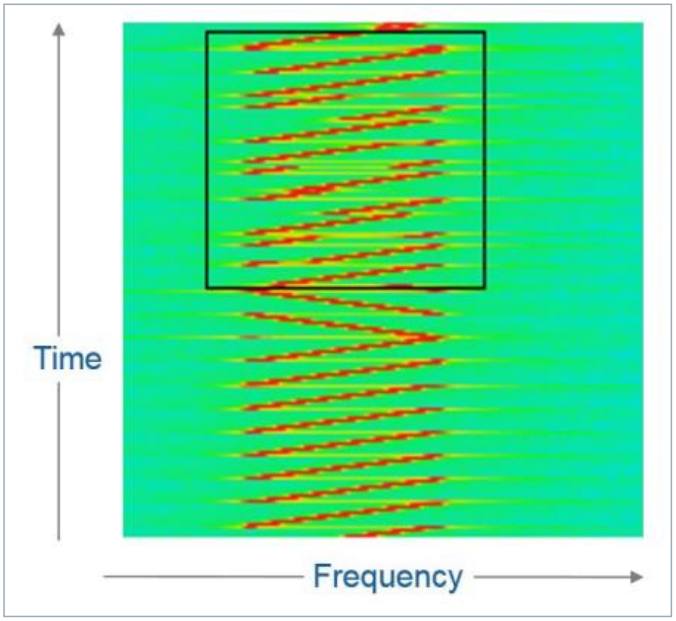


图2 由上升/下降斜率的多个脉冲构成的LoRa信号

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。

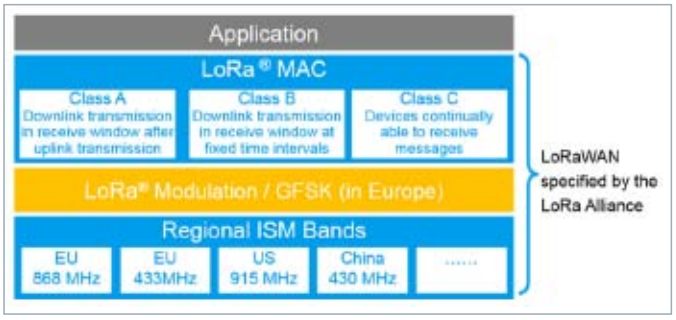


图3 LoRaWAN协议栈

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。

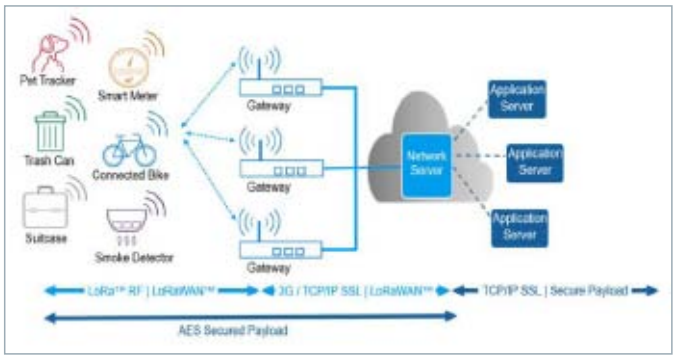


图4 LoRaWAN网络架构

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

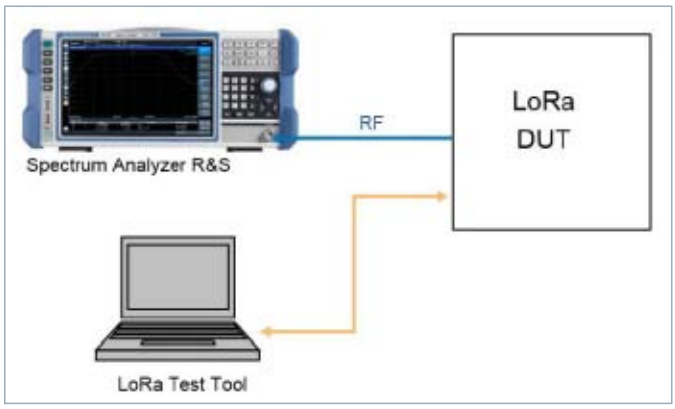


图6 LoRa发射机测试连接

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。

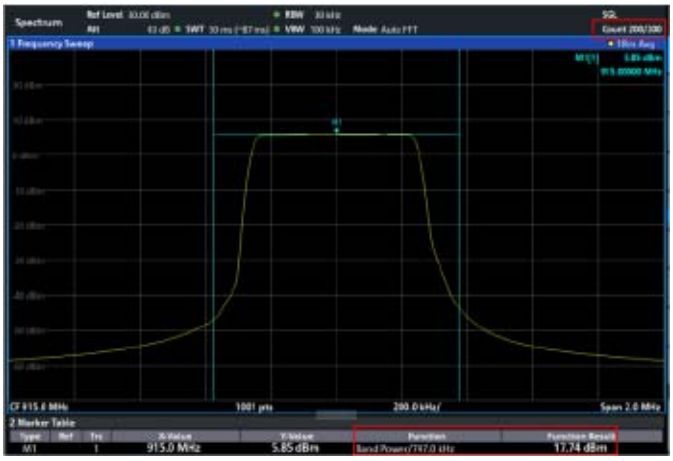


图8 扩频系数=12发射功率

接收机测试

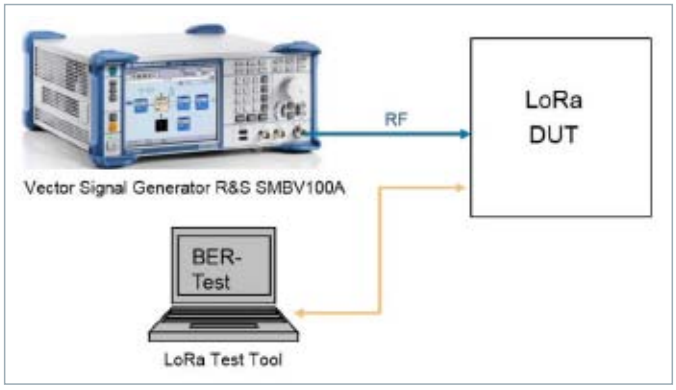


图9 LoRa接收机灵敏度测试布置

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。

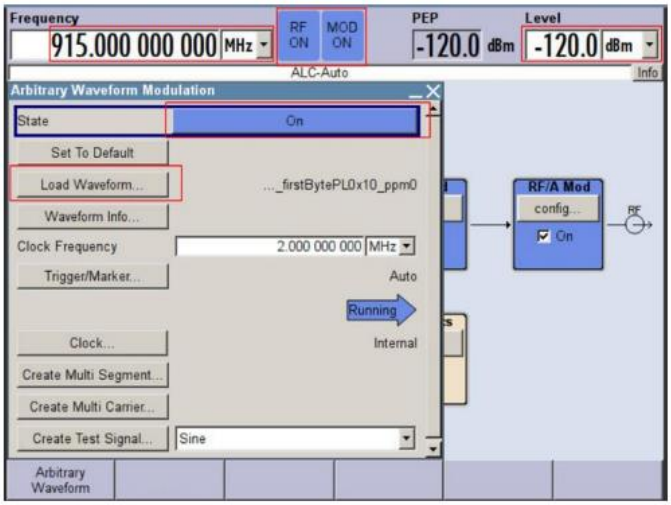


图10 矢量信号源设置界面

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，典型误报包率数值要求为＜1%。

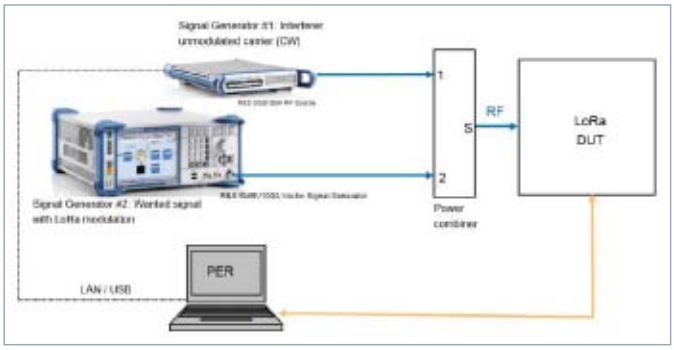


图11 LoRa接收机阻塞测试布置

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。

定购信息

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,φM	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下，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。

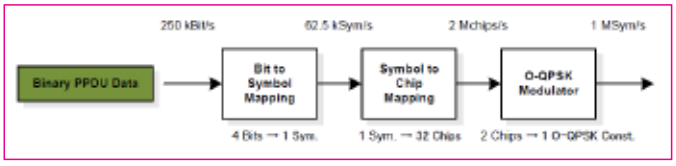


图3 O-QPSK PHY扩频和调制映射

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。

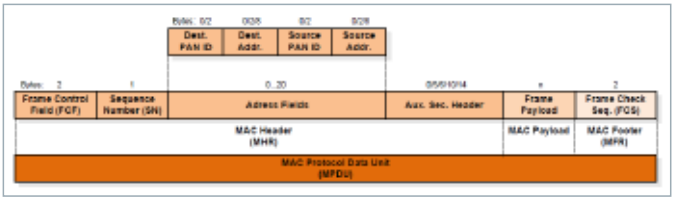


图4 MAC MPDU帧结构

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。

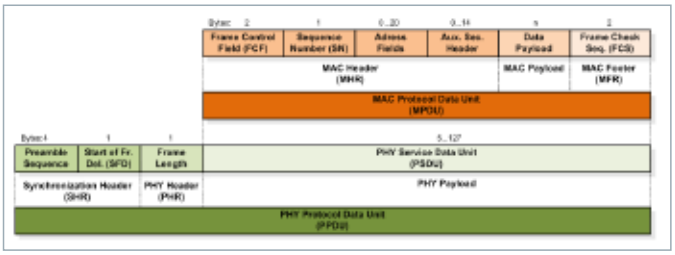


图5 R&S IEEE_802.15.4 Frame Builder软件界面

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下图6。

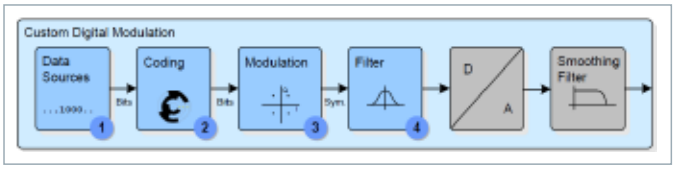


图6 自定义数字调制波形产生

- 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，所以无需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：

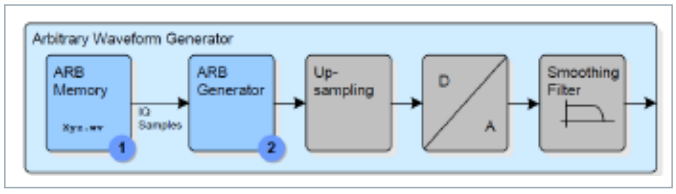


图7 ARB模式波形产生

- 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。

定购信息

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