

物联网终端性能与网络协议综合测试解决方案

李晶¹, 张明明², 郑永丰¹, 胡顺平³, 王奇之¹

(1. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041; 2. 中国航天科工集团有限公司, 北京 100048;
3. 空间电子信息技术研究院, 西安 710100)

摘要: 随着物联网和网络协议技术的广泛应用, 相应的测试需求增长愈加猛烈; 为了测试采用 Wifi/Bluetooth/Zigbee/IPv6 以太网等协议开发的设备或产品是否符合其相应协议标准, 从而达到实现之间的一致性与互通性, 对 Wifi/Bluetooth/Zigbee/IPv6 以太网等协议的测试规范进行了研究, 分析了各个协议的测试项, 介绍了基于 NI 的 PXIe-5840 射频矢量收发模块和以太网协议测试等自研成熟模块及软件算法搭建的物联网综合测试仪, 该综测仪采用了 PXIe 总线架构, 集仪器测试、协议测试和流程测试于一体的结构设计, 经实际应用可满足 Wifi/Bluetooth/Zigbee/IPv6 以太网等协议的物理层射频性能和协议层性能的测试需求。

关键词: 物联网; 射频测试; 协议测试

Comprehensive Test Solution for IOT Terminal Performance and Network Protocol

Li Jing¹, Zhang Mingming², Zheng Yongfeng¹, Hu Shunping³, Wang Qizhi¹

(1. Beijing Aerospace Measurement and Control Technology co. LTD, Beijing 100041, China;
2. China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100048, China;
3. CAST—Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: With the wide application of Internet of things (IOT) and network protocol technology, the corresponding test demand is growing more and more fiercely. To test whether a device or product developed using Wifi/Bluetooth/Zigbee/IPv6 protocol conforms to its corresponding protocol standard, achieving consistency and interoperability between them, study these test specifications of these protocols, analysis test items, and introduces the IoT comprehensive tester based on NI PXIe-5840 RF vector transceiver module, self-develop mature module and software algorithm, which adopts PXIe bus architecture, sets instrument testing, protocol testing and process testing in one of the structural design, to implement RF performance and Protocol layer performance Test, which can support Wifi/Bluetooth/Zigbee/IPv6 wired and wireless technology.

Keywords: IOT; RF test; protocol test

0 引言

随着中国的经济实力和科技水平的日益提高, 无线和有线通讯技术也在突飞猛进。通讯技术发展至今已经有多种成熟的通讯标准, 不同标准之间的差异决定了其应用领域的不同。现代通讯技术主要使用了 Wifi/Bluetooth/Zigbee/IPv6 以太网等通信标准。

随着通讯标准的更新, 智能网络协议测试也正在大力发展, Wifi/Bluetooth/Zigbee 等主流无线通信协议以及 Ipv6 以太网有线协议的测试需求愈加明显。各项协议规定了一个系统在和其他系统进行通信时应遵守的规则, 为了使得不同开发商实现的系统之间能够正确的通信, 就要使用标准化的协议。但是, 协议标准目前基本上都是使用自

然语言描述的, 实现者对协议的不同理解也会导致不同的协议实现, 有时甚至会是错误的协议实现。因此, 必须对不同厂家的通信协议进行标准测试, 以此对协议实现进行评价, 发现协议实现的错误, 提高协议实现的互通能力。

一个智能工厂的实施一般采用多种不同通信协议以及网关, 解决智能测试中遇到的问题, 能够对多种协议进行测试的物联网综合测试方案是值得认真考虑的。

1 应用场景

针对智能工厂、物联网等的测试、维护的需求, 我公司开展了无线通信协议测试技术、有线网络协议测试技术等技术研究, 研制出了一种便携式物联网综合测试仪, 提供了仪器测试、协议测试和流程测试 3 种测试模式, 实现了对 Wifi/Bluetooth/Zigbee/ipv6 以太网等的通信协议测试功能, 支持无线信号的终端射频性能综测和以太网的协议性能测试, 适用于终端生产综测、产品功

收稿日期: 2019-07-05; 修回日期: 2019-07-31。

作者简介: 李晶(1989-), 女, 河北沧州人, 大学本科, 工程师, 主要从事物联网协议分析, PXIe 系统集成与测试方向的研究。

能性能验证等场景为物联网的使用维护提供了便捷的一体化测试设备。

由于物联网细分场景繁多, 存在更加复杂、极端的环境部署情况, 验证单点关键技术的性能与指标难度加剧同时, 物联网终端的形态趋于多样化, 需要测试仪表具备更好的可扩充性和兼容性。鉴于目前 5G 物联网发展势头强劲, 本公司研制的物联网综合测试仪已在硬件方面完成对 NB-IoT 等 5G 相关协议测试的支撑, 软件方面只需根据协议测试需求进行相应更新即可完成相关测试。

2 测试项

2.1 Wifi

Wifi 测试规范需要测试的测试项包括发射机发射功率、中心频率容限、误差矢量幅度、发射频谱掩模四项发射性能指标以及一项接收指标: 接收机灵敏度^[1]。

2.2 蓝牙

蓝牙测试规范要求的测试项包括: 发射机功率测试(输出功率、功率密度测量、功率控制)、输出频谱测量(功率范围、-20dB 带宽、邻频道功率)、发射频谱模板、误差向量幅度、载波频率漂移; 接收机测试包括单间隙灵敏度测试、多间隙灵敏度测试、误包率测试、载干比测量、互调测量、阻塞性能、最大输入电平测量^[2]。

2.3 Zigbee

ZigBee 测试规范主要包括的测试项有: 发射机的输出功率、频谱发射模板、发射杂散、中心频率容限、误差向量幅度 (EVM); 接收机的灵敏度、最大输入电平、阻塞性能、符号速率偏差容限、能量检测、链路质量指示^[3]。

2.4 Ipv6 以太网

Ipv6 以太网测试规范 RFC2544 中对一致性和性能测试方面主要包括的测试项包括: 协议一致性、吞吐量、时延、帧丢失率和背靠背帧^[4]。

3 物联网综合测试仪

物联网综合测试仪集成了信号源与分析仪的双重功能, 采用一体化结构设计, 通过“三化”设计, 集成了微波信号发生、信号分析、网络协议测试和开关适配等功能, 仅需一台仪表即可完成相应的协议测试, 并开发了流程测试功能, 对于产品的批量测试节约了很多时间。同时兼顾了通用的仪器测试, 可以对除了物联网协议以外的其他射频信号做基本的发生和分析测试工作

物联网综合测试仪主要包括主机、无线通信物理层测试分析模块、以太网协议测试模块、测试接入模块等硬件设备以及物理层协议测试分析软件、以太网协议测试软件等软件模块组成。

系统总体组成如图 1 所示。

物联网综合测试仪软件平台在通用化的硬件平台基础上, 采用硬件功能软件化和软件功能构件化技术来实现频率测量、功率测量、频谱分析、EVM 分析、吞吐量和丢包率等测试需求。

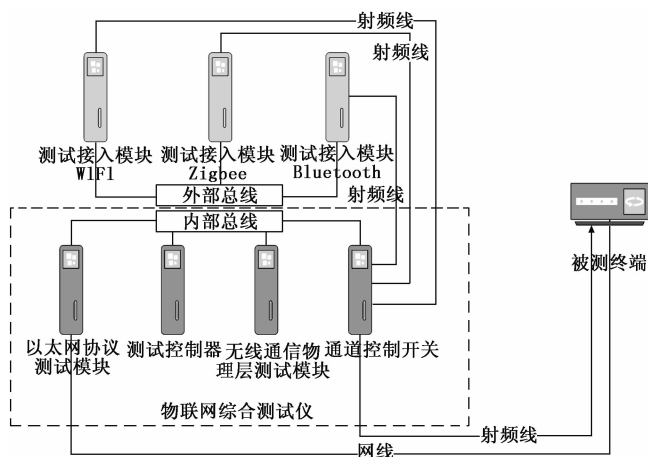


图 1 物联网综合测试仪总体组成框图

3.1 系统指标

3.1.1 矢量信号发生

矢量信号发生部分指标如表 1 所示。

表 1 矢量信号发生指标

序号	名称	指标
1	输出频率	2~6GHz
2	中频带宽	240MHz
3	输出功率	10~-95dBm
4	输出功率精度	0.5dBm
5	采样率	16bit
6	谐波	<-50dBc
7	杂散	<-45dBc
8	载波抑制	<-40dBc
9	残余 EVM	<-40dBc
10	调制方式	0.5BTGFSK、 $\pi/4$ -DQPSK、8DPSK、BPSK、QPSK、16-QAM、64-QAM、256-QAM
11	频响平坦度	± 0.5 dB

2) 矢量信号分析

矢量信号分析部分指标如表 2 所示。

表 2 矢量信号分析指标

序号	名称	指标
1	输入频率	2~6GHz
2	中频带宽	240MHz
3	最大输入功率	30dBm
4	功率精度	0.5dBm
5	测频精度	± 10 kHz
6	频响平坦度	± 1 dB
7	残余 EVM	<-40dBc
8	触发电平	<-40dBm
9	本底噪声	-130dBm/Hz@6GHz
10	解调方式	0.5BTGFSK、 $\pi/4$ -DQPSK、8DPSK、BPSK、QPSK、16-QAM、64-QAM、256-QAM

3) 以太网协议测试

以太网协议测试模块指标如表 3 所示。

表 3 以太网协议测试模块指标

序号	名称	指标
1	接口	RJ45×4
2	速率/模式	10/100/1000M, 自协商/强制, 半/全双工模式
3	数据帧长	34—16K Bytes
4	净荷内容	递增、递减、随机、自定义
5	数据完整性	乱序、净荷校验、二层 FCS
3	支持协议	IPv4、IPv6、TCP/UDP、TCP6/UDP6、ICMPv4/v6、IGMP、ARP、PPPoE、Vlan、MPLS、802.3、LLC/SNAP
4	IPv4 到 IPv6 协议转换	>800Mbit/s
5	并发用户数	>6000
6	并发连接数	>60000

4) 其他指标

综测仪结构、环境指标如表 4 所示。

表 4 其他指标

序号	指标名称	指标
1	结构体积	350 mm(长)×265 mm(宽)×150 mm(高)
2	重量	≤12kg
3	供电	交流 220V/50Hz, 500W
4	环境条件	工作温度: 0℃—50℃ 存储温度: -40℃—70℃ 相对湿度: 5%—95%(无凝露)

4 系统硬件设计

4.1 无线通信物理层测试模块

无线通信物理层测试模块采用了 NI-5840 模块, 该模块采用零中频架构, 内部结合了矢量信号发生器、矢量信号分析仪、高速串行接口和基于 FPGA 的实时信号处理和控制在, 具备 1 GHz 瞬时射频带宽, 9 kHz~6 GHz 的射频矢量信号收发功能。

其具体原理和实物如图 2 和图 3 所示。

NI-5840 模块每个输入和输出通道只有一个端口, 该模块采用了零中频架构, 在信号输出状态时, FPGA 产生的基带信号产生两路数字基带矢量信号, 矢量信号直接通过一阶混频上变频至 6 GHz 矢量信号输出;

在信号接收状态时, 输入矢量信号经过衰减滤波和下变频, 之后该基带矢量信号经过数字化仪变为数字信号, 之后该数字信号被传输至 FPGA 进行处理。

4.2 以太网协议测试模块

以太网协议测试模块为公司自主研发的 PXIe 网络板卡, 可适应各种测试环境。基于 WinPcap 实现高速流量发生与数据包捕获技术, 使得该模块具备全线速流量发生以及捕获与过滤功能, 实现了全线速流量发生, 该技术可用于 IPv6 网络的性能测试、协议测试、认证测试、安全性测

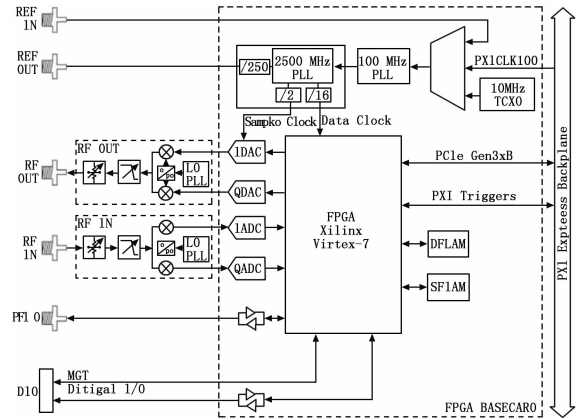


图 2 NI-5840 模块原理图



图 3 NI-5840 模块实物图

试等测试中。其原理和实物如图 4 和图 5 所示。

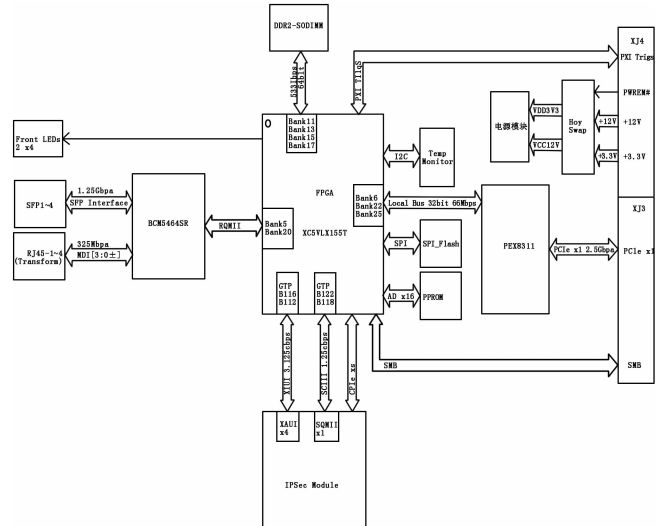


图 4 以太网协议测试模块原理图

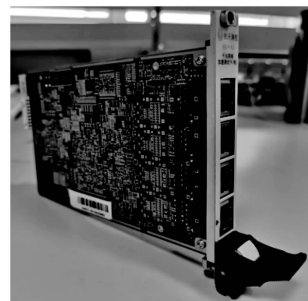


图 5 以太网协议测试模块

该模块具有 Ipv4 和 Ipv6 协议栈, 每个端口支持 64 条独立的数据流, 每条流可支持 4 个跳变域, 能够仿真数万个接口, 模拟千万级用户连接, 测试模块支持多种协议模板, 支持基于端口和流的精确调速, 支持动态调速, 数据表的内容及速率可以灵活配置, 可进行复杂协议的测试、仿真及一致性测试。其网络输入接口为 4 个 RJ45 电网卡 (支持 10/100/1 000 M)。RJ45 网口输入的网络包经过 PHY 芯片完成网络包的物理层处理, 然后由 PHY 芯片的 MAC 层接口 (RGMII) 接入到 FPGA 芯片中, PHY 芯片与 FPGA 直接是 MAC-MAC 互连。FPGA 的 MAC 接口收到包后直接将包缓存到外部的 DDR2 SDRAM 中, 根据一定的流水线, 边线速缓存边读取缓存的包到 FPGA 内部的 FIFO 中, 然后提取包头、控制字等信息存入内部的 Block RAM 中, 输出的数据进入 L2/L3 层协议解析模块完成处理, 结合内部的测试域参数得到测试结果^[5-6]。

4.3 射频通道开关模块

射频通道开关是为了实现被测终端信号至无线通道物理层测试模块以及测试接入模块的通道自动切换, 主要由三个单刀双掷和一个单刀三掷射频开关组成。开关切换至无线通信物理层模块可以对无线信号的射频性能进行测试, 切换至外接测试接入模块时可进行相关信号的协议测试。其原理和实物如图 6 和图 7 所示。

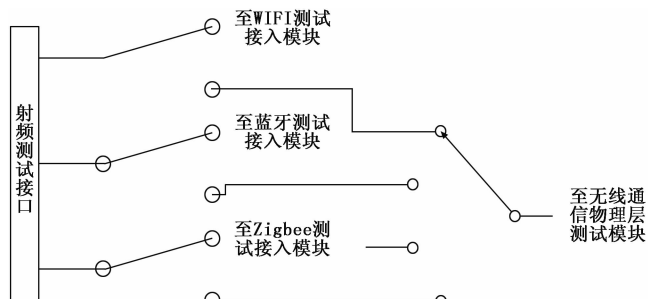


图 6 射频通道开关模块



图 7 射频通道开关模块

5 系统软件设计

5.1 软件设计

软件平台主要由综合管理控制软件和测试功能软件 (含以太网协议测试软件、无线通信物理层测试软件、ZigBee 协议测试软件、蓝牙协议测试软件模块、WIFI 协议测试软件模块) 组成。各测试模块在综合管理平台的调度下顺序实现各种测试及显示功能, 并将测试数据存入数据库。每项功能测试完成后, 软件均会给出详细测试结果以及测

试是否合格的结论。

软件架构如图 8 所示, 包括操作系统、底层模块驱动程序以及上层应用程序三个部分。这三个部分的功能如下所示:

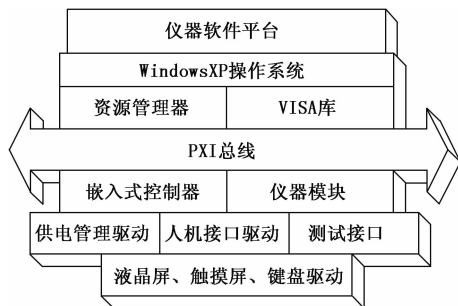


图 8 系统软件架构

1) 系统软件通过 Window 7 操作系统采用的消息响应控制方式, 在内核和应用程序、驱动程序之间传递信息, 进程管理器负责任务调度;

2) 底层模块驱动程序主要包括: 仪器模块驱动、USB 驱动程序、LAN 驱动程序、键盘驱动程序、显示模块驱动程序等, 它主要完成对底层物理设备的功能封装, 给应用程序统一的调用接口, 既保证了模块使用的简洁性, 也保证了系统的安全性;

3) 应用层主要包括测试软件平台, 可根据软件功能要求分别实现各个功能块对应的软件程序。测试软件平台可根据用户选择的状态或用户自定义的参数值, 调用相关算法, 计算低频信号控制字, 并下发给低频控制及信号测量模块, 实现数据计算与下发功能。

软件主要功能是通过远程控制和本地控制实现功能选择、参数设定输出特定的测试信号, 其软件功能如图 9 所示。

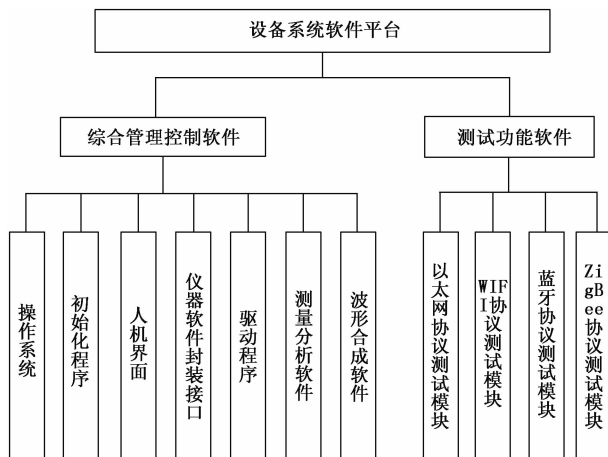


图 9 软件平台组成框图

软件平台包括综合管理控制软件、测试功能软件及数据管理模块, 分别实现以下功能:

4) 综合管理控制软件:

综合控制管理软件包括操作系统、人机界面、初始化程序、仪器软件封装接口、测量分析软件、波形合成软件、驱动程序等。

(1) 操作系统采用 Windows 7 系统, 便于操作人员熟

练操作。

(2) 初始化程序完成仪器的初始化工作，包括：启动、对系统运行变量、通信链路、外部设备等的初始化工作，并负责启动系统的人机接口。

(3) 人机界面采用便于用户操作的图形化中文人机界面。人机界面提供了系统显示与应用程序之间对用户操作键盘、鼠标做出响应的通信机制。

(4) 测量分析软件主要是对输入的无线通信射频信号测量结果的计算分析和处理，并对输出信号提供设置参数。

(5) 波形合成软件通过对无线通信协议要求，或对自定义参数的分析处理，计算出频率、功率、调制参数等控制字，然后调用底层驱动函数下发到相应的硬件控制模块。

(6) 仪器软件封装接口提供了 RTS 与外部测试仪表驱动程序之间的软件接口，封装接口支持符合即插即用规范的所用命令与响应，符合 COM/DCOM 规范的方式实现软件封装接口。

(7) 驱动程序负责为上层软件和底层硬件的交互通信建立链路。

6 物联网综合测试仪样机

物联网综合测试仪采用了一体机结构，机身采用全铝镁合金结构、一体化设计，集成了液晶显示屏、多点电容触摸屏。内部采用抗震动压卡设计，提高了扩展板卡工作的可能

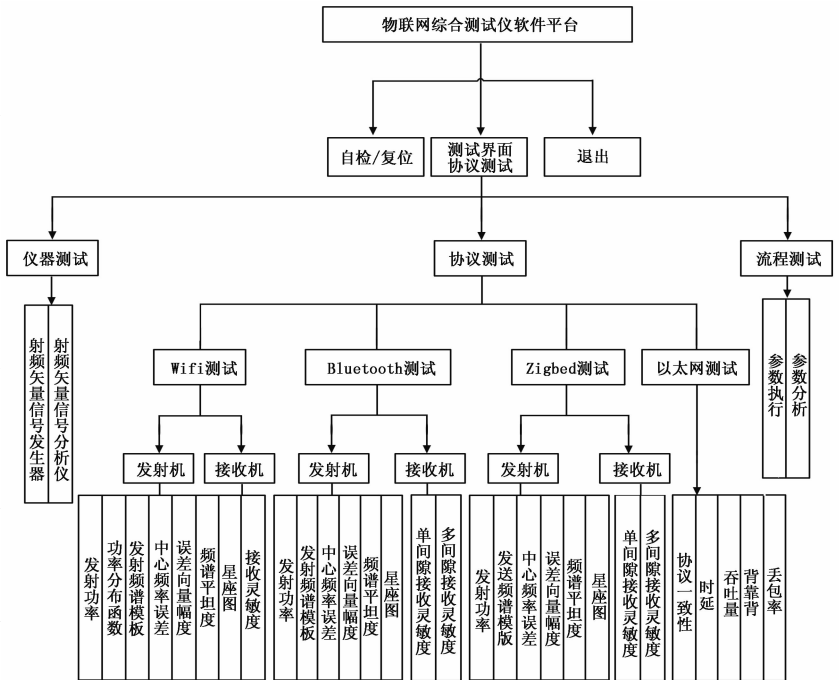


图 10 物联网综合测试仪软件组成框图

5) 测试功能软件：

(1) 以太网协议测试软件模块：配合以太网协议测试模块，完成以太网协议测试分析，包括吞吐量、丢包率、时延、背靠背、一致性等。

(2) WIFI 协议测试软件模块：配合 WIFI 协议测试模块，完成 802.11a/b/g/n/ac 协议射频测试分析，包括发射机发射功率、中心频率容限、误差矢量幅度、发射频谱掩模四项发射性能指标以及一项接收指标：接收机灵敏度等。

(3) 蓝牙协议测试软件模块：配合蓝牙协议测试模块，完成蓝牙 2.0/3.0/4.0 协议射频测试分析，包括发射机功率测试（输出功率、功率密度测量、功率控制）、输出功率谱测量（功率范围、-20dB 带宽、邻频道功率）、发射频谱模板、误差向量幅度、载波频率漂移；接收机测试包括单间隙灵敏度测试、多间隙灵敏度测试、误包率测试、载干比测量、互调测量、阻塞性能、最大输入电平测量等。

(4) ZigBee 协议测试软件模块：配合 ZigBee 测试模块，完成 ZigBee 协议射频测试分析，包括发射机的输出功率、频谱发射模板、发射杂散、中心频率容限、误差向量幅度 (EVM)；接收机的灵敏度、最大输入电平、阻塞性能、符号速率偏差容限、能量检测、链路质量指示等。

5.2 软件功能设计及操作界面

物联网综合测试仪软件实现了有线和无线信号频率、功率、频谱、EVM 等多种性能参数的测试功能，其在通用化的硬件平台基础上，采用了硬件功能软件化和软件功能构件化技术来实现频率测量、功率测量、频谱分析、EVM 分析等功能软件模块，并重点考虑通信测试和维修保障的实用性和便捷性的要求，依据模块驱动结构原理，实现显示界面、流程测试、系统管理等功能软件模块，软件组成框图及测试页面如图 10~15 所示。

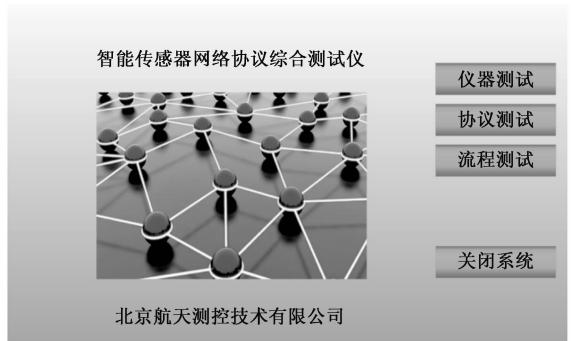


图 11 物联网综合测试仪主界面

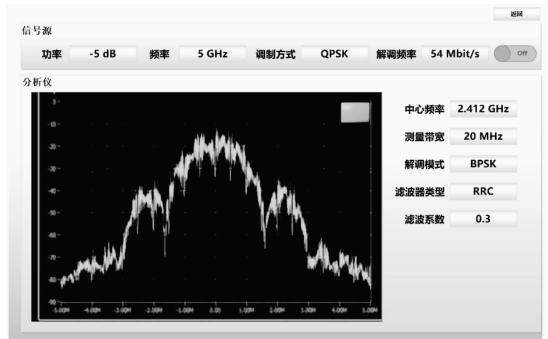


图 12 仪器测试页面

性。机身配备了 13.3 寸液晶显示屏，使得综测仪可以方便地进行图形处理和数据分析，背板采用 3U6 槽 PXIe 架构。

(下转第 73 页)