

基于 Visual Studio 的多通道相参接收机测试系统设计^{*}

陈小荣¹ 唐 涛¹ 王晋杰²

(1. 成都信息工程大学电子工程学院 成都 610225; 2. 是德科技(中国)有限公司 成都 610041)

摘 要: 设计了一款基于 Visual Studio 的多通道相参接收机测试系统。该系统由是德科技有限公司的模块化设备构成,包括数字采集接收机 M9703A、信号源 M9380A(由源输出 M9301A、锁相环 M9310A、频率参考 M9300A 组成)、4 路下变频器 M9362A、IF(intermediate frequency, IF)放大/衰减器 M9352A 及功率计 N1911A 等。通过程序设计,实现 PC(personal computer, PC)端对其进行指令控制。该系统使得测试过程简捷,可完成多达 16 通道的相参测试。整套系统在使用中性能良好、稳定性强,该系统测试幅度误差在小于 0.1 dB,相位误差小于 1°。

关键词: 模块化;多通道;相参;测试系统

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Designing of a multi-channel coherent receiver testing system based on the Visual Studio

Chen Xiaorong¹ Tang Tao¹ Wang Jinjie²

(1. School of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;

2. Keysight (China) Technologies CO., LTD. Chengdu 610041, China)

Abstract: A multi-channel coherent receiver testing system has been designed, which based on the Visual Studio. It consists of the modules which are provided by the Keysight Technologies CO., LTD, including digital receiver M9703A, signal source M9380A (made of the source output M9301A, phase-locked loop M9310A and frequency reference M9300A), Quad down-converter M9362A, IF Amplifier/Attenuator M9352A and Power meters M1911A. The system can be controlled on PC by program designing, and it makes the measurement convenient finish sixteen coherent channels testing. The system is stable and performing well, the amplitude error is less than 0.1 dB, the phase error is less than 1 degree.

Keywords: modular; multi-channel; phase coherent; test system

1 引 言

电子测量仪器的发展已经开始从仪器面板繁琐地按键操作逐步演化为由软件控制的模块化、一键式测量方式,这也避免了用户因复杂的操作可能导致的测量失误,提高了仪器测量的可靠性和有效性。模块化的测量产品与一体式仪器相比,具有体积小,便于运输、携带,测试功能更多,更能满足个性化的测试需求,更重要的是对于流水线大大提高了生产率。

在多通道相参系统中,相参系统需要 4 个条件:共

本振信号、共参考频率信号、共采样时钟信号、共触发信号。国内外的相参测试系统多用于雷达接收方面和 MIMO(multi-input-multi-output)技术上。庞少龙^[1]研究了相参实现的条件;吴志毅,陈铮等人研究接收机处理数据等理论研究^[2-7];HALL D^[8]设计的多通道相参测试适用于 MIMO 测试,但相位误差在长时间测试时达到 4.5°以上;CAO Z^[9]设计的多通道相参接收机通过测试,幅度误差在 0.4~1.8 dB,相位误差在 0.5~1.8°;而 WEN Z^[10]设计的相参雷达系统方面的没有具体的指标说明,由上述可知,做一个性能较好的相参系

收稿日期:2015-07

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(61201095)、四川省科技支撑计划(2015GZ0282)、四川省教育厅科研(13ZB0076)项目

统是比较难的,如何解决通道间相参成为了系统认证的一个最关键的问题,即幅度一致性和相位一致性,一致性的好坏直接影响一个系统的测试能力。

传统的相参接收机使用矢量网络分析仪或者示波器,然而它们的测试端口都不超过4个。对于矢量网络分析仪,虽然能提供4个通道的相参接收,但由于其内部中频带宽最大只有15 MHz,因此针对具有一定带宽大于15 MHz的调制信号,矢量网络分析仪无法作为接收机进行处理;对于示波器,由于其DAC位数有限一般为8 bit,测试精度因此受到限制,更重要的是示波器是一个宽带接收机,因此进入示波器的噪声多,从而底噪高,测试动态范围小,一般小于48 dB,这些不良因素限制了多通道相参接收机拥有良好的测试性能。另外,通道数目至多只有4个通道,不能满足多数的多通道测试。本测试系统突破了传统的设计,采用高速数字采集模块M9703A具有8通道相参功能^[1],通道间的延时小于50 fs,ADC垂直分辨率为12 bit,比传统的示波器分辨率提升了4 bit,无杂散动态范围扩展到63 dB,比传统测量提升了15 dB。采样率为1.6 GSa/s,可以直接捕获直流到2 GHz的信号,可以通过内部数字下变频模式扩展动态范围,降低底噪;通过智能降低采样率和带宽,减少数据量,在5 s内完成测试(1 024次平均),延长捕获时间,最大时间戳持续时间达52 d。同时,本系统利用89601数字解调软件对多通道的信号同时进行实时解调分析。本系统通过软件编程来控制两台M9703A同步工作,构成16通道的相参接收机。由于M9703A接收频率范围有限,本测试系统采用了其他模块化的混频器和IF调理,来提高测试频率范围和动态范围,目前能达到50 GHz以内的测试需求。相比于目前的相参系统,长时间测试幅相一致性性能:幅度误差小于0.1 dB,相位误差小于1°,具有测试过程方便快捷、测试结果准确可靠等特点,从整体来说,对于相参接收机系统拥有了全新的测量设计。

2 测控系统组成

系统使用M9037A PXIe embedded controller可直接嵌入具有18槽位的M9018A机箱,并且通过PCIE(peripheral component interface express, PCIE)接口对各个机箱的模块进行控制。

M9362A模块具有4路下变频功能,能同时为四通道提供相参下变频,系统通过本振信号菊花链连接方式,提供4个M9362A,同时实现多达16通道的下变频功能,如图1所示。

M9380A是由100 MHz的参考频率源、M9301A的频综、M9310A的功率输出3部分组成,本系统采用M9380A信号源作为M9362A下变频器的本振信号。至此下变频功能模块具有16路相参功能。

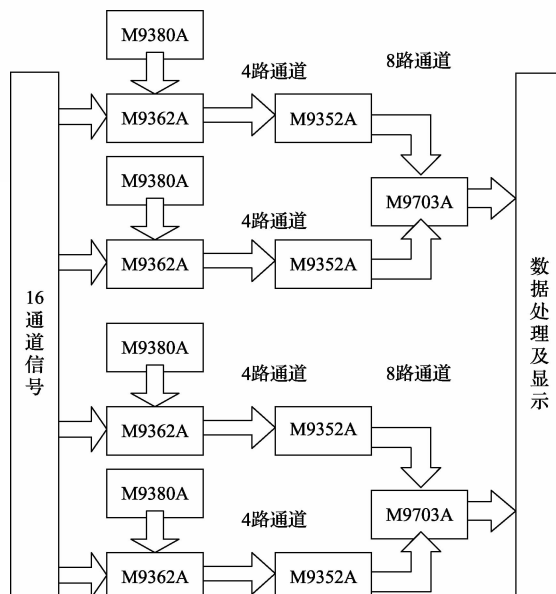


图1 测试系统

M9352A是中频调理部分,每个模块具有4个通道,对下变频后的信号进行放大或者衰减,为进入后端链路提高测试的信噪比或者防止接收机增益压缩。系统使用4个M9352A能同时进行16路的中频信号进行调理。

M9703A是一款高速数字采集接收机,具有8个独立通道,最高可达1.6 GSa/s的采样率,本系统使用2个M9703A,能同时接收16通道的DC 2 GHz的射频信号,本测试系统通过外部触发(脉冲函数任意波发生器81150A)和M9703A自身的软触发,采样时钟由M9018A机箱背板提供的100 MHz的方波信号,再对射频信号进行数字下变频,采用自身的8个相位相干的通道提供的独立本振信号,以高达400 MHz的采样率得到IQ数据。

3 相参接收机相参测试及校准

3.1 相参测试原理

上述器件组成的测试系统中,由于两块M9703A在同一个M9018A机箱中,共用机箱提供的参考频率100 MHz信号;每个模块提供8个相位相干的通道提供的独立本振信号;选用两块采样率相同的M9703A;最后通过外部触发源进行同步触发或M9703A内部自带的软触发,再通过软件控制两块M9703A同步操作,就能使接收机系统相参。为了使接收机频率范围变广,在M9703A前端添加相参的下变频器和中频调理,从而整个接收机系统实现全相参。

实现2块M9703A同步的代码如下:

```
int[] handle_slave1 = new int[1];
handle_slave1[0] = agDrvr_instr2. ModuleSynchronization. Handle; agDrvr_instr1. ModuleSynchronization.
```

ConfigureSlaves(handle_slave1);

3.2 校准原理

由于 M9703A 内部没有信号源,所以不能提供校准信号,因此本系统由外部源 M8190A 提供校准信号,并使用功分器对每个端口进行同时校准,通过软件编程控制 M9703A 获取的各个通道的 IQ 数据,经过数据处理得到校准所得的幅度和相位数据保存于 Excel 表格里,开始测试时对各路通道的幅度和相位进行补偿,从而达到校准的目的。

3.3 测试流程

测试系统流程简单易懂,测试步骤少,尽可能在短时间完成测量,保证测试的高效率。测试流程主要环节如图 2 所示。

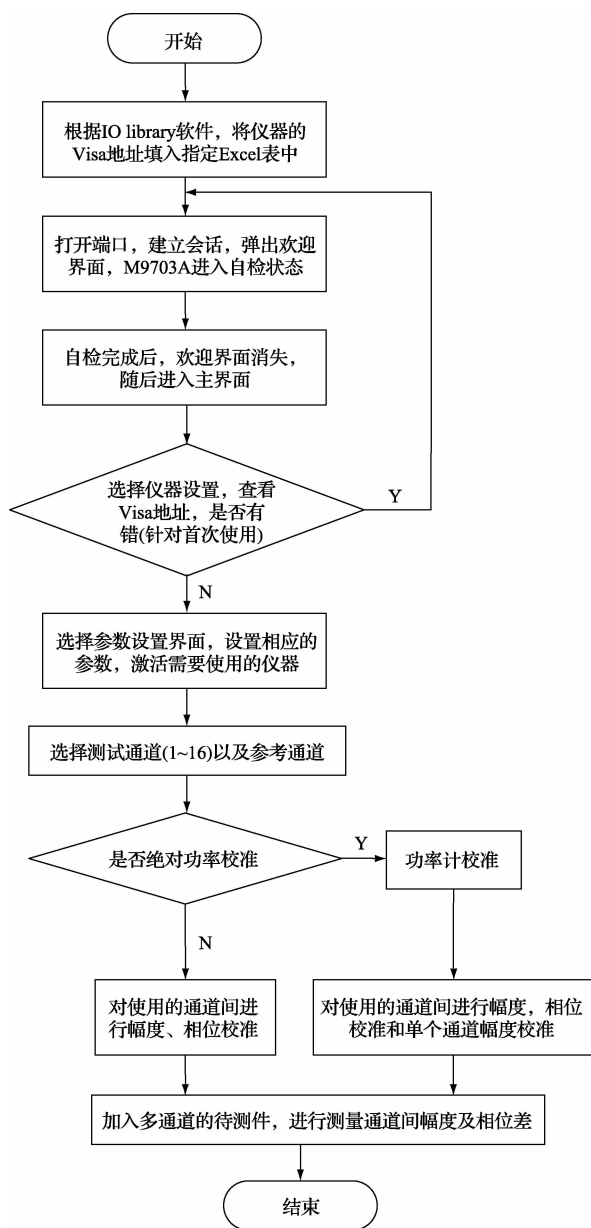


图2 测试流程

3.4 数据处理

最多可达 16 路的测试信号通过 4 个 M9362A 4 路下变频器变成 IF 信号,经过 M9352A 4 路中频调制器,放大或衰减来保障测试信号的精确度,随后进入 M9703A 高速数字采集接收机,通过 M9703A 1.6 GSa/s 的高速采样率以及数字下变频成更低的中频信号,最终由 M9703A 采集的 IQ 数据,合成信号的绝对幅度及绝对相位。

采集的 IQ 数据转化成电压 U ,由式(1)合成信号绝对幅度:

$$\text{Amplitude: } U = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (1)$$

$$P_{\text{linear}} = U^2 / 50 \quad (2)$$

$$P_{\text{non-linear}} = 10 \lg(P_{\text{linear}}) \quad (3)$$

$$\text{Phase: } \theta = \arctan(Q/I) \quad (4)$$

由式(2)将其转换成功率(通道阻抗为 50 Ω),通过软件设置的平均次数,由式(3)对功率值进行平均后再转换成对数功率(即功率平均)。其绝对相位由式(4)得到,最后再求相位平均。

使用功率计 N1911A 测试信号幅度,将得到的功率值作为修正值对各路通道进行修正,再通过差值运算得到各路通道的幅度误差和相位误差,将这些误差作为修正值再对各路通道进行幅度相位校准,从而达到幅度一致性和相位一致性。部分运算代码如下:

```
for (int i = 0; i <= 15; i++) // 获取选中通道的 IQ 交织数据
```

```
{ if (checkedListBox1.GetItemChecked(i))  
{ First. A[i]. MultiRecordMeasurement. FetchMulti-  
RecordWaveformInt16 ( 0, numRecords, offsetWithin-  
Record[i], numPointsPerRecord, ref WaveformArray_in-  
str2[i], ref ActualRecords_instr2[i], ref ActualPoints_  
instr2[i], ref FirstValidPoint_instr2[i], ref InitialXOff-  
set_instr2[i], ref InitialXTimeSeconds_instr2[i], ref InitialX-  
TimeFraction_instr2[i], ref XIncrement_instr2[i], ref  
ScaleFactor_instr2[i], ref ScaleOffset_instr2[i]);}}
```

```
for (int i = 0; i <= 15; i++)  
{ xlWorkSheet. Cells[i + 2, 1] = ("Ch " + (i +  
1));
```

```
xlWorkSheet3. Cells[i + 2, 1] = ("Ch " + (i +  
1));
```

```
if (checkedListBox1.GetItemChecked(i))  
{ ab_Amplitude[i] = double. Parse(ab_Amplitude  
[i]. ToString("0.0"));
```

```
Diff_Amplitude[i] = double. Parse(Diff_Amplitude  
[i]. ToString("0.0"));
```

```
ab_Angle[i, 0] = double. Parse(ab_Angle[i, 0].  
ToString("0.00"));
```

```
if(checkbox1.Checked) ( 进行绝对功率校准)
```

```

{
    xlWorksheet.Cells[i + 2, 2] = ab_Amplitude[i];
// 校准后的绝对幅度
    xlWorksheet3.Cells[i+2, 2] = ab_Amplitude[i] +
((Excl. Range) xlWorksheet2. Cells[18, 2]). Value -
((Excl. Range) xlWorksheet2. Cells[i + 2, 3]). Value;
// 平均后的绝对幅度
    //校准后的相对幅度差
    xlWorksheet. Cells[i + 2, 3]=Diff_Amplitude[i];
    xlWorksheet3. Cells[i+2, 3]=Diff_Amplitude[i] -
((Excl. Range) xlWorksheet2. Cells[i + 2, 3]). Value;
//平均后的相对相位差
    xlWorksheet. Cells[i + 2, 4] = ab_Angle[i, 0];
    xlWorksheet3. Cells[i + 2, 4] = ab_Angle[i, 0] -
((Excl. Range) xlWorksheet2. Cells[i + 2, 4]). Value;
//数据显示于 datalistview 控件中
    dataGridView1. Rows[i]. Cells[1]. Value = ab_Am-
plitude[i] + ((Excl. Range) xlWorksheet2. Cells[18,
2]). Value - ((Excl. Range) xlWorksheet2. Cells[i +
2, 3]). Value;
    dataGridView1. Rows[i]. Cells[2]. Value = Diff_
Amplitude[i] - ((Excl. Range) xlWorksheet2. Cells[i
+ 2, 3]). Value;
    dataGridView1. Rows[i]. Cells[3]. Value = ab_An-
gle[i, 0] - ((Excl. Range) xlWorksheet2. Cells[i + 2,
4]). Value;
}
else ( 不进行绝对功率校准)
{
    xlWorksheet. Cells[i + 2, 2]=ab_Amplitude[i]; //
绝对幅度
    xlWorksheet3. Cells[i + 2, 2]=ab_Amplitude[i] -
((Excl. Range) xlWorksheet2. Cells[i + 2, 3]). Val-
ue; // 平均后的绝对幅度
    //相对幅度差
    xlWorksheet. Cells[i+2, 3]=Diff_Amplitude[i];
    xlWorksheet3. Cells[i+2, 3]=Diff_Amplitude[i] -
((Excl. Range) xlWorksheet2. Cells[i + 2, 3]). Value;
}

```

4 软件界面设计

本测试系统通过仪器的自检环节后,进入到图3所示的主界面,所有测试功能设置在此界面相应的按钮上,点击即可进入对应的界面设置参数或进行测试。



图3 测试系统的主界面

点击菜单栏第一个按钮进入到参数设置页面如图4所示,此页面包括对下变频器,中频放大/衰减器和数字采集接收机参数的设置,为后面测试做好准备,用户可根据实际频率高低和功率大小考虑是否采用下变频器和中频放大/衰减器。

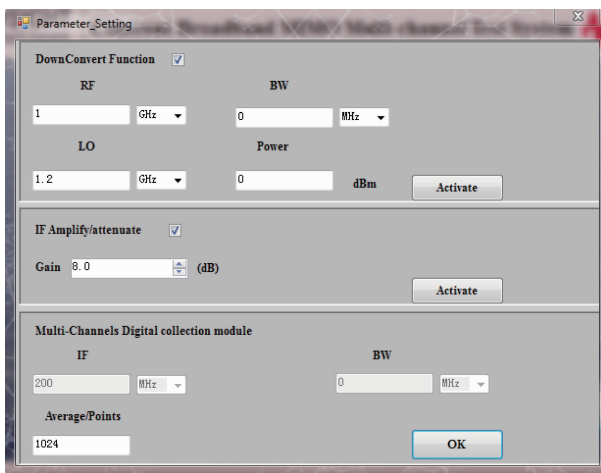


图4 下变频器、IF调谐和数字采集接收机参数设置面板

设置好参数后,点击主界面的第二个按钮即可进入测试界面如图5所示,根据用户需求是否选择进行单通道功率校准,由图5可知,测试以通道1为参考通道,通过功率计标定出进入通道1的信号功率为5.05 dBm,由于接收机内部各个通道损耗各不相同,因此可以看到接收机各个通道检测到信号幅度差大约有2 dB,相位差有38°的差异。作为校准数据,可以知道各个通道与参考通道的幅度相位差。如图6所示,校准后的测试数据表明,所有通道都通过校准,功率理想情况下补偿到5.05 dBm,幅度差为0 dB,相位差为0°。由于噪声的存在,导致各个通道的绝对功率不相等、幅度差和相位差都不为0,由数据显示,幅度差在0.1 dB内,相位差在1°内。相比于传统的相参接收机测试系统,本系统的幅度相位一致性是有明显的改善。

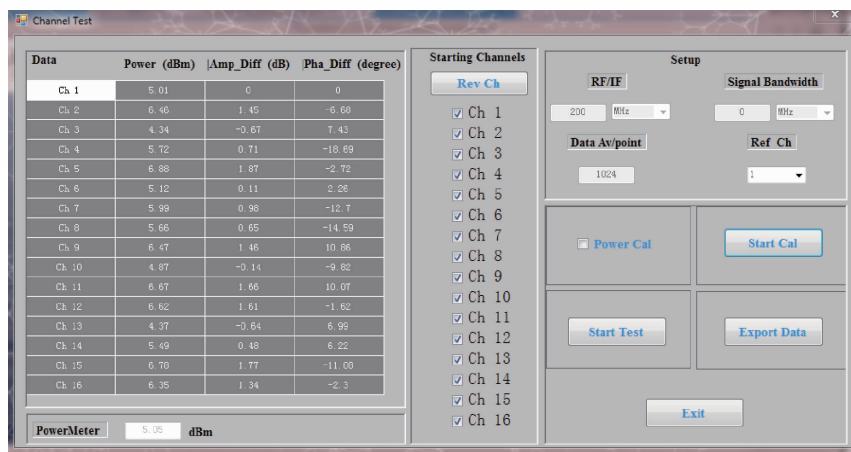


图5 一组校准数据结果

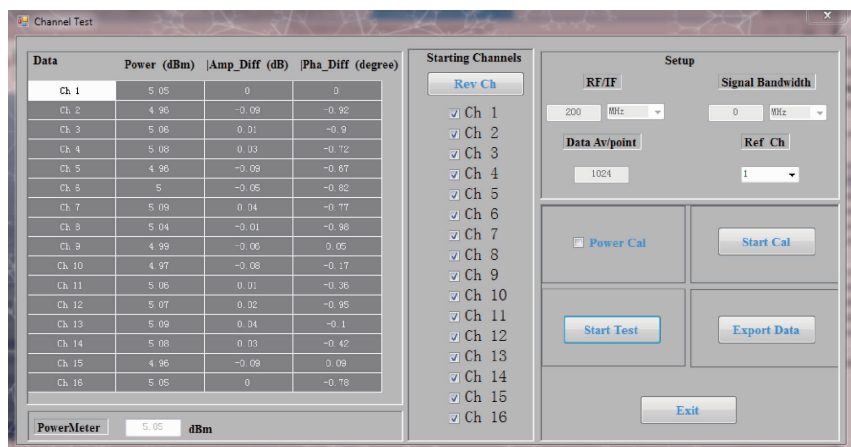


图6 一组测试数据结果

测试完成后,可以导出测试数据到 Excel 表格进行数据分析,也可以查看 IQ 波形。

5 结 论

本文设计了能同时测量多达 16 通道信号、具有较高稳定性的多通道相参接收机测试系统。通过 Visual Studio 程序设计,实现 PC 端对是德科技有限公司模块化的 M9703A 高速数字采集, M8190A 宽带任意波发生器, M9380A 信号源, 4 路下变频器 M9362A, IF 放大/衰减器 M9352A 及功率计 N1911A 等仪器实现指令控制。在相参接收机测试系统中,利用全新的测量仪器,搭建了一种新颖的测试平台。相比于传统的测试系统,在相参幅度相位一致性方面,有了进一步的改善,该系统幅度误差在 0.1 dB 内,相位误差在 1° 内。应用于雷达和 MIMO 等多通道测试系统中,会有更高的测量精度。后期还会对其功能做进一步的扩展,如发射部分由 M8190A 信号源产生 16 路相参信号,通过扫频模式,来测量待测件的传输特性,比如增益和相移特性等。

参 考 文 献

- [1] 庞少龙. 多通道数字接收机相位同步技术研究[D].

西安:西安电子科技大学, 2013.

- [2] 汤春林, 汪学刚, 陈祝明. 基于距离走动校正的星载雷达空中动目标检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(10):829-834.
- [3] 乔纯捷, 马路, 黄志刚. 一种星载数字波束形成系统的通道幅相校正方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(增刊 2):73-77.
- [4] 陈曦, 邓振森, 焦计平. 多通道高速相参同步数据采集与存储系统设计[J]. 电子测量技术, 2013, 36(12):104-107.
- [5] 宿纪民, 汪普宏. 一种超宽带相参雷达目标模拟器设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(1):65-68.
- [6] 陈铮, 曲秀杰, 李炳沂, 等. 一种雷达数字中频接收机处理方法与实现[J]. 电波科学学报, 2014, 29(6):1212-1218.
- [7] 吴志毅, 徐秀会. X 波段中频相参多普勒天气雷达接收机的设计[J]. 电子设计工程, 2015(1):90-92.
- [8] HALL D, HINDE A, JIA Y. Multi-channel Phase-coherent RF measurement system architectures and performance considerations[C]. Military Communica-

tions Conference (MILCOM), 2014; 1318-1323.

- [9] CAO Z. Test technology for amplitude-phase coherence of multi-channel phase coherent signal[C]. 2013 IEEE 11th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), 2013; 212-215.
- [10] WEN Z, ZHENG P, LUO M, et al. Calibration method of amplitude and phase consistency of W-band transceiver components[C]. 2014 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), 2014; 902-905.
- [11] DICKSON A. Digitizer-based phase coherent meas-

urements for multi-antenna phased array applications [C]. AUTOTESTCON, 2013; 1-10.

作者简介

陈小荣, 1989年出生, 硕士, 主要研究方向为微波电路与系统。

唐涛, 1982年出生, 博士后, 副教授, 主要研究方向为天线与电波传播。

王晋杰, 1984年出生, 硕士, 是德科技(中国)有限公司成都开放实验室主任, 主要研究方向为微波电路与系统。

是德科技 UXM 支持 600 Mbps 数据吞吐量测试以及 4×4 DL MIMO、载波聚合和增强的内置信道仿真

新版 UXM 软件可以帮助开发人员全面验证其设计

主要优点:

- 1) 新 UXM 软件版本支持 4×4 MIMO 数据吞吐量测试
- 2) 添加 TM9 和空间信道模型, 可以实现真实的终端性能验证

2015年12月9日, 是德科技公司日前宣布, 工程师利用 UXM 全新下行链路 4×4 MIMO 功能, 配合使用 2 个子载波成功完成了 Cat 12 数据速率验证。通过两个 20 MHz 子载波、64 QAM 下行链路调制和 4×4 下行链路 MIMO 技术, 是德科技在两台阵列连接的 UXM 无线测试仪上实现了 600 Mbps 下行链路数据速率。

是德科技移动宽带事业部总经理 Satish Dhanasekaran 表示: “功能强大的 UXM 平台主要用于满足高阶 MIMO 与高阶调制和多载波技术要求, 例如最新支持的 4×4 MIMO, 以便充分发掘 LTE-Advanced 的潜力。我们非常高兴能够快速并持续丰富 UXM 平台的测试功能, 从而帮助验证工程师迅速高效地开发尖端产品并加快产品导入市场的速度。”

除了 4×4 DL MIMO, 新款 UXM 产品还支持传输模式 9(TM9)。TM9 是 3GPP 标准第 10 版的一部分, 目的是充分发挥多天线和束波成形技术的效用, 实现更完善的干扰管理。

同时, 是德科技发布了 UXM 内置信道仿真器的重大更新, 增加了对空间信道模型(UMi 和 UMa)的支持, 可以让开发人员实现更真实的终端性能评估和验证。

是德科技移动宽带事业部营销经理 Garrett Lees 表示: “相比市场现有综合测试仪, 升级将全面增强内置信道仿真器的功能。这不仅能够确保 UXM 系列产品出色的竞争力, 而且可以显著提升其可用性, 改善工程师开发与测试下一代产品的能力。”

借助多个发射和接收天线, MIMO 能够支持更高的数据速率、更大的容量和更出色的信元边界性能。以 LTE 系统固有的 2×2 MIMO 为基础, LTE-Advanced 增加了发射和接收天线数量, 可以实现高达 8×8 下行链路 MIMO 和 4×4 上行链路 MIMO 配置。结合载波聚合与高级调制机制, 高阶 MIMO 有能力提供更出色的移动体验。

如欲了解更多关于 Keysight UXM 无线测试仪的信息, 请访问 www.keysight.com/find/UXM。浏览高清图像, 请访问 www.keysight.com/find/UXM_images。观看 UXM 通用功能演示视频, 请访问 YouTube 网站。有关 E7515A UXM 的定价和配送信息, 请访问 www.keysight.com/find/contactus 并与是德科技联系。