

国产芯片自动测试系统射频测试模块设计

郑永丰, 张贵恒, 董 阳, 刁 静, 王奇之

(北京航天测控技术有限公司, 北京 100041)

摘要: 针对当前射频芯片性能不断增强和应用日益广泛的现状, 同时为了满足 5G 射频芯片测试需求, 结合当前国际先进芯片自动测试技术, 重点对国产芯片自动测试系统射频测试模块开展设计; 通过对当前市场常用射频芯片以及 5G 射频芯片测试需求研究, 通过采用小型化设计优化矢量信号收发模块的性能; 为解决测试频率不断升高带来的问题, 设计中采用模块化变频设计来拓展芯片测试频率范围; 同时设计 4 个射频信号通道, 每个通道具有 4 个射频端口, 最大能够对 16 个被测件进行测试, 显著提高芯片测试效率; 该系统能够完成 50 M~12 GHz 矢量信号发射和分析, 同时具有噪声系数测试, S 参数测量, 双音信号生成等功能。

关键词: 射频芯片自动测试系统; 矢量信号生成和分析; S 参数测试; 噪声系数测量

Design of Radio Frequency Test Module of Domestic Automatic Test Equipment System for Integrated Circuit

Zheng Yongfeng, Zhang Guiheng, Dong Yang, Diao Jing, Wang Qizhi

(Beijing Aerospace Measurement and Control Technology Co., Ltd., Beijing 100041, China)

Abstract: In the view of current situation that the performance of radio frequency integrated circuit (RFIC) continues to enhance and the application of RFIC is increasingly widespread. At the same time, in order to meet the testing requirements of RFIC employed in 5G application, the design of radio frequency test module of domestic automatic test equipment (ATE) system for integrated circuits is developed on the basis of international advanced automatic testing technology of integrated chip. By investigating the market demand of testing requirements of common RFIC and RFIC employed in 5G applications, the performance of radio frequency (RF) transceiver module is optimized with technique of miniaturization design. Furthermore, the modularity design of frequency converter which solves the problem of increasing frequency of RFIC is utilized to increase the application range of the system. There are four RF channels, and each channel has four RF ports, so at most 16 device-under-test (DUT) can be measured by the system, and testing efficiency of system are improved markedly. In summary, the system can transmit and analyze 50 M-12 GHz vector signal along with functions of noise figure measurement, S-parameter measurement and generation of two-tone signal.

Keywords: RFIC ATE system; generation and analysis of vector signal; S-parameter measurement; noise figure measurement

0 引言

集成电路产业分为设计、制造、封装、测试 4 个环节, 集成电路测试技术是发展集成电路产业的三大支撑技术之一, 因为它是保证集成电路性能和质量的关键环节。集成电路测试成本十分昂贵, 高成本的测试技术制约了集成电路产业的发展。目前集成电路测试成本在整个产业成本中超过 50%, 未来甚至能超过 80%^[1]。以上现象最主要的原因是随着工作频率的不断提高, 射频集成电路的测试成本不断增加。因此, 为了促进集成电路测试技术快速发展, 降低测试设备成本和缩短测试时间成为节约测试成本的主要途径^[2]。因此高效率射频集成电路测试系统和高性能射频集成电路测试设备研制成为集成电路产业升级的关键技术。

国外研究人员主要通过提高射频测试设备综合性能及

性价比和采用高效率的自动化并行测试来节约射频芯片测试成本。在自动化并行测试设备设计中, 尤其在芯片量产过程中采用的测试设备在性价比、功能覆盖度和功能匹配度等方面具有较高的需求^[3]。当前量产测试主要采用自动化测试设备 ATE (automatic test equipment)^[4]。业界比较知名的集成射频模块的 ATE 测试系统有美国泰瑞达公司的 ULTRAFLEX 测试系统、日本爱德万公司的 T2000 及 V93000 测试系统^[5]。而在提升射频测试仪器综合性能方面的代表有美国 NI 公司发布的射频矢量收发仪系列模块为组成核心的芯片测试系统 STS。

国内在芯片自动化测试系统这一领域基础较弱, 多数自动化测试都基于国外引进测试设备开展研究^[6-8]。当前国内集成电路产业恰处于快速发展的机遇期^[9], 射频芯片测试需求和测试成本不断对测试设备提出新的要求。因此, 国产射频芯片自动化测试系统开发成为促进产业发展的当务之急。本文重点开展国产射频芯片自动测试系统开发与设计。如图 1 所示, 国产芯片自动测试系统中包含模拟测试模块、数字测试模块、射频测试模块、时钟测试模块和

收稿日期: 2019-07-15; 修回日期: 2019-07-31。

作者简介: 郑永丰(1982-), 男, 浙江人, 硕士, 高级工程师, 主要从事射频微波仪器产品方向的研制。

电源管理测试模块等,测试中电源管理测试模块、数字测试模块、时钟测试模块等配合射频测试模块对射频芯片及综合性的多功能芯片进行自动化测试。

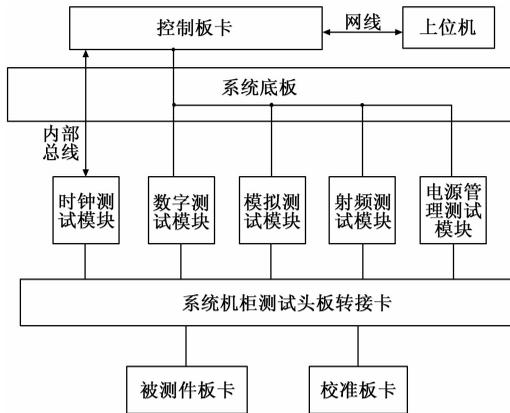


图 1 国产芯片自动测试系统架构示意图

本文主要针对 50 M—12 GHz 国产芯片自动测试系统射频测试模块开展研究与设计。针对 WIFI、蓝牙等多款商用芯片的射频测试需求,并结合 5G 通信技术协议中主要射频指标,本文中射频测试模块能够完成矢量信号收发、矢量信号频谱分析、双音信号产生、S 参数测量,噪声系数测量等多种功能。这套自主研制系统覆盖当前和未来主流射频芯片的测试指标,并填补国内射频芯片自动测试模块设计的技术空白。

1 系统结构及原理

射频测试模块可单独作为一个子系统进行设计,系统结构如图 2 所示,该系统包含两个部分:矢量信号收发模块、射频前端模块。每个部分都由两个相同的模块来构成整个系统,该系统具有 4 个射频通道,16 个射频测试端口。

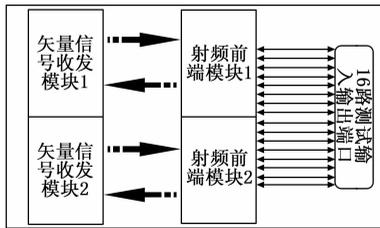


图 2 射频测试模块硬件结构框图

从系统功能上来说:

1) 矢量信号收发模块:在发射信号状态下,模块产生 50 M—6 GHz 矢量信号并输出到后级,信号带宽最大为 1 GHz;在接收信号状态下,模块对接收的 50 M—6 GHz 矢量信号进行幅度和相位分析,信号带宽最大为 1 GHz。同时具备双音信号产生功能。

2) 射频前端模块:射频前端模块由变频单元和射频开关单元构成。变频单元对矢量收发信号进行变频操作,实现 50 MHz—12 GHz 矢量信号生成和分析功能,矢量信号带宽最大为 1 GHz。射频开关单元主要由路径选择电路和

增益调整电路构成,可以完成 S 参数测量、噪声系数测量等功能。射频单元包含 16 路射频信号输入输出端口,各端口工作频率范围为 50 M—12 GHz,信号带宽最大为 1 GHz。

射频前端模块可以根据未来芯片工作频段拓宽进行同步更新设计,可以直接将频率由 6 GHz 扩展至 18 GHz 或更高的频率,因而使整个测试系统具有更好的扩展性,方便技术升级。

射频开关单元包含 4 个射频通道,每个射频通道有 4 个射频端口,4 个射频通道工作频率范围为 50 M—12 GHz,信号带宽最大为 1 GHz。它主要由路径选择单元和增益调整单元构成,射频开关单元可以完成 S 参数测量、噪声系数测量等功能。

综上,本系统具有矢量信号发生器、矢量信号分析仪、频谱分析仪、噪声系数分析仪、矢量网络分析仪的 S 参数测量等功能。能够完成 50 M—12 GHz 矢量信号收发、50 M—6 GHz 双音信号产生、50 M—6 GHz 的 S 参数测量,50 M—12 GHz 噪声系数测量等,功能基本覆盖常用射频芯片的线性度、增益、输出功率、效率、反射系数、噪声系数等性能。

2 系统硬件设计

2.1 矢量信号收发模块

矢量信号收发模块功能如图 3 所示。它由超宽带低相噪频率合成子模块、IQ 基带调制解调子模块、宽带调制剂功率放大单元和宽带滤波及功率控制单元组成。

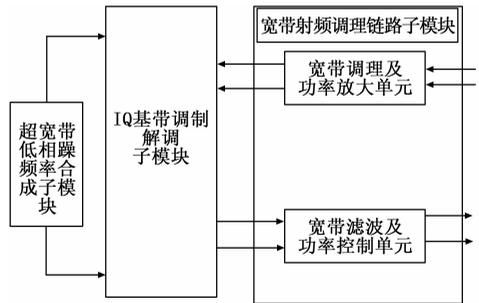


图 3 矢量信号收发模块功能框图

在发射状态下,数字模拟信号转换器(DAC)产生数字信号并将数字信号转换为模拟信号,由 DAC 产生的模拟信号经过 IQ 基带调制解调子模块进行信号调制,在 FPGA 内进行自适应脉冲成型滤波处理,得出自适应脉冲成型滤波器的最优化参数,参数更新后对数字滤波器可调参数进行控制,对输出信号频谱点进行适量延时补偿,与原信号进行矢量合成输出。

在接收状态下,接收的射频信号首先进入宽带滤波及功率控制单元进行滤波和功率调整,之后信号进入 IQ 基带调制解调子模块进行解调,解调后的信号进入模拟数字信号转换器(ADC)进行模数转换,在 FPGA 中对高速 ADC 数据进行并行宽带实时信号处理,将高速 ADC 数据降速为

4 路时序间插信号, 然后输入数据降速处理模块, 数据降速处理模块将 4 路时间间插信号转换为 4 段时间连续信号, 以实现多信号处理通道并行执行, 而信号处理通道内则采用流水线作业。每个通道间, 数字信号首先和正交的两路数字本振实现数字下变频, 将信号混到零频, 然后进入多级抽取滤波器组进行降速率和滤波处理。滤波器可以根据不同带宽需求进行配置—实现在测试过程中带宽改变, 滤波后的数字信号在 FPGA 中完成 FFT、检波等工作。

为解决矢量信号收发模块体积过大的技术难题, 设计中采用小型化设计作为关键技术。设计中首先借鉴软件无线电发展成果, 能用数字方式解决技术难题都用数字方式来解决, 降低变频单元的设计难度; 射频模块的设计方案中选用尽小体积器件和简洁的方案, 可以采用微机电器件和体积小的滤波器等小型化的微波芯片和单片电路, 同时对于宽带射频微波电路, 要在设计中采用基于微波芯片的二次混合集成 PCB 设计方法, 所有的器件全部设计在一张完整的 PCB 上, 从而尽可能的缩减模块电路体积。

2.2 射频前端模块

2.2.1 变频单元

变频单元主要对测试矢量信号频率进行变换, 主要包含上下变频模块。上变频的电路原理如图 4 所示, 其中主要包含本振信号链路和上变频链路, 本振信号链路主要为上变频模块提供稳定的频率源; 上变频链路主要对变频前后的信号进行滤波和增益调整。下变频电路的设计思路和上变频信号类似, 工作原理不再赘述, 其电路如图 5 所示。

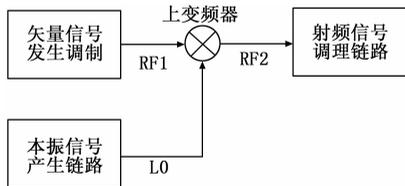


图 4 上变频电路示意图

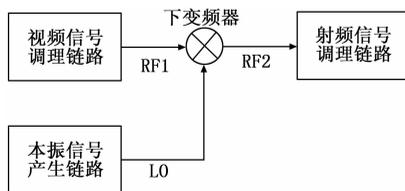


图 5 下变频电路示意图

2.2.2 射频开关单元

射频开关单元中的多路选择通道设计是实现高效率、多功能并行测试的关键技术。它的电路原理如图 6 所示, 根据功能要求合理设计多路选择开关和增益调理模块组成的射频通道。开关矩阵所包含的每个通道中信号发射路径和信号接收路径是分离的, 每个通道的最大信号带宽均为 1 GHz。同时设计中以提高测试效率为指导原则, 尽可能多的增加射频链路的复用率, 通过并行分配信号来实现多功

能和高效率测试。同时射频开关单元能够辅助系统完成 S 参数测量、噪声系数测量等功能。

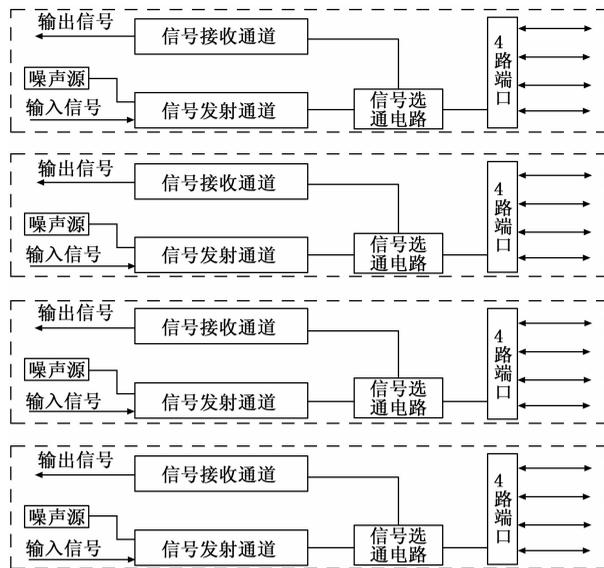


图 6 多路射频开关单元中多路选择通道设计

在射频前端模块设计中采用复杂整体腔体屏蔽技术, 在模块射频电路设计中, 为增强整体腔体屏蔽能力, 除了增加滤波器和射频开关外, 在结构设计上也需要注意。将每个混频器电路和锁相电路都尽量设计在独立腔体中, 设计中各个腔体均采用内嵌式盖板结构, 各腔体间不能有缝隙, 腔体盖板上安装孔的间距为四分之一波长, 腔体与盖板间采用凹槽并填充导电材料的方式增加屏蔽效果。

3 系统软件设计

3.1 软件设计思路

应用软件从实现功能上主要分为以下 5 个套件: 矢量信号生成软件、矢量信号分析软件、S 参数测量软件、噪声系数测量软件、测试流程下载软件。下面简述各个软件功能:

1) 矢量信号生成软件能够完成多达 16 路 50 MHz~12 GHz 连续波或 PSK、FSK、MSK、16QAM 等矢量调制信号产生和传输。软件能够产生 2 路独立矢量信号并生成双音信号, 可以完成信号频率、功率、带宽和调制类型等参数设置。

2) 矢量信号分析软件能够接收和测量多个无线信号, 提供可视化和射频分析功能, 方便同时查看各个信号主要频率信息、调制 IQ 星座图和 EVM。还可以实现矢量信号的频谱分析功能。

3) S 参数测量软件为射频芯片提供 S 参数测量功能, 软件控制矢量信号收发单元与射频前端模块的通道选择, 最终提供可视化分析功能, 可以查看反射系数、驻波比等多个参数。

4) 噪声系数测量软件控制噪声源输出, 并通过对控制信号接收通路完成噪声信号采集, 最后通过调用噪声系数

算法包进行噪声系数处理，最终提供可视化数据显示噪声系数。

5) 测试流程设置下载软件完成测试流程参数的编辑与程序烧写，测试时集成电路测试系统软件选择测试流程，本软件进行参数编写并完成程序下载，为了节省不必要的硬件开销，软件每一次下载更改参数，对于没有更改的参数，默认原始值。

软件设计中根据每个测试功能的实际测试流程，在软件中配置了相应的校准流程、测试步骤、测试数据自动存储流程和图形化显示。同时在每个软件功能模块中设置测试性能的合格指标及指标不合格时被测件编号和指标报警信息界面。

3.2 软件功能框图

系统软件设计一个总工作界面，工作界面中包含各个子功能单元，每个子功能单元都具有独立子界面，每个子界面都包含相应的控件，用来控制测试过程中相关硬件参数的设置和硬件系统的配置。

在应用程序启动参数配置好以后，可以在任意时刻启动应用程序。应用程序功能如图 7 所示。

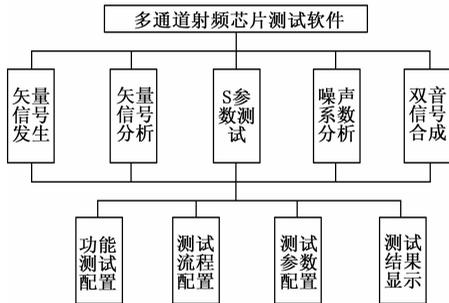


图 7 应用程序功能框图

在用户输入参数后，应用程序将改变的参数设置到接口（算法）层，接口层在接收到参数改变时，先将已改变的参数缓存起来，然后终止当前测量，等待应用启动下一次测量。应用发起下一次测量时，接口层将先配置已经改变的参数，然后启动数据采集，在数据采集完成后执行相应的对齐算法，在完成对齐后反馈数据到应用层，应用层根据当前所处测量类型完成相应测量并更新显示。

4 系统指标与分析

4.1 系统指标

为覆盖当前射频芯片的主要测试指标，同时能够准确把握射频芯片测试指标未来的发展趋势，设计中通过对当前主流射频芯片的功能指标和对当前主流测试设备性能指标进行详细调研，最终确定射频测试模块中各个测试功能模块的指标如表 1 所示。

4.2 系统结构

图 8 为国产芯片自动测试系统示意图，将本文设计的射频系统板卡插入到图 8 中系统的机箱中，同时在整个测试系统的软件功能接口调用射频系统的软件界面就可以进行射频芯片测试。测试中首先利用校准板对系统进行校准，

表 1 射频测试模块功能指标

矢量信号发生器	频率范围	50MHz~12GHz
	最大输出功率	10dBm
	功率步进	1dBm
	信号带宽	1GHz
矢量信号分析仪	输出功率准确度	±0.90dB
	频率范围	50MHz~12GHz
	最大接收功率	30dBm
	绝对功率准确度	±0.95dB
S 参数测量	信号带宽	1GHz
	动态范围	≥60dB, 1dB 步进
	频率范围	50MHz~12GHz
	频率分辨率	1Hz
噪声系数测试	动态范围	80dB
	测试精度	±20%
	频率范围	50MHz~12GHz
	ENR	≥13dBm
双音信号合成	噪声系数测量范围	0~20dB
	噪声系数测量不确定度	≤±0.5dB
	频率范围	50MHz~12GHz
	最大输出功率	10dBm
双音信号合成	功率步进	1dBm
	输出功率准确度	±0.90dB

然后将被测芯片所在的测试板与自动化测试系统的测试头转接板相连，通过在软件中设计配置测试系统硬件参数即可完成射频芯片的自动化测试以及综合性能芯片中射频电路性能的测试。



图 8 国产芯片自动测试系统实物图

5 结束语

本文主要介绍国产芯片自动测试系统射频测试模块的研究与设计。射频测试模块采用模块化、可配置化的设计思路将系统分为矢量信号收发模块和射频前端模块。射频测试模块设计中采用 16 个射频端口来提高测试效率，并通过系统设计来完成噪声系数测量、S 参数测量、合成双音信号等多个射频参数测试。同时通过应用软件的设计来使整个系统的自动化测试更加方便和快捷。国产芯片自动测试系统射频测试模块测试频率为 50~12 GHz，最高测试带

(下转第 49 页)