

软件无线电硬件平台 MHAL 接口符合性测试方法

胡宇, 文永康, 徐卫, 罗文, 龚建全

(成都天奥测控技术有限公司, 成都 611731)

摘要: 软件无线电通信架构源自美军联合战术无线电系统, 在军用、民用领域得到广泛应用; MHAL 是 SCA 关键技术之一, 用于实现软件与硬件的解耦; 为测试验证软件无线电平台的 SCA 标准符合性, 文章依据 MHAL 应用程序接口标准提出测试方法; 标准主要包括 GPP、DSP、FPGA 的 MHAL 接口和 RFchain 消息等几个部分的内容, 规定了其接口函数、消息格式和消息命令等; 针对 MHAL 接口, 通过设计测试用例调用 API 接口函数进行 MHAL 消息传输, 检查消息传输正确性, 完成软件接口测试; 针对 RFchain 命令, 通过 MHAL 消息发送控制命令, 利用标准仪器测量信道输出响应、射频参数, 验证硬件平台接口符合性和性能指标; 最后搭建测试系统, 对多家单位研制的软无装备进行测试, 结果表明测试方法合理可行, 能适应不同架构的软无被测设备, 有效验证硬件平台 MHAL 接口符合性。

关键词: 软件通信结构; 计算单元; 硬件抽象层; 射频链路; CORBA

Method of Conformance test for Software Definition Radio Platform MHAL API

HU Yu, WEN Yongkang, XU Wei, LUO Wen, GONG Jianquan

(Spaceon T&C Technology Co., Ltd., Chengdu 611731, China)

Abstract: Software communication architecture (SCA) is derived from the project of US Joint Tactical Radio Systems and widely used in military and commercial fields. Hardware abstraction layer MHAL is one of the key technologies of SCA, the decoupling of software and hardware is realized. In order to test the conformity for SCA Standards in the no hardware and software platform, according to the standard, the test method is proposed. The standard mainly include GPP API, DSP API, FPGA API and RFChain information. The standard specifies interface functions, message formats and commands. FMHAL interface test is designed to call API interface functions by test cases, and MHAL message transmission and check is conducted, the software API test is completed. For the RFChain command test, the control command is sent through MHAL message, and the channel output response and RF parameters are measured by standard instruments to verify the compliance and performance index of the hardware platform interface. Finally, the test system is built to test the SDR platforms developed by different manufacturers. The results show that the test method is reasonable and feasible, which can adapt to the SDR equipment with different architectures, and the MHAL interface compliance of hardware platform is effectively verified.

Keywords: SCA; CE; MHAL; RFChain; CORBA

0 引言

软件无线电通信架构 (SCA, software communications architecture) 源自美军联合战术无线电系统 (JTRS) 计划, 联合战术无线电系统是基于软件无线电通信架构规范而构建的软件无线电通信装备体系, 其开放性、灵活性、可移植性、扩充性相对传统的无线电通信装备来说得到了较大的提高^[1]。软件无线电通信架构规范对无线电通信装备的软件体系结构、硬件体系结构、波形体系结构、管理体系结构、测试体系结构以及安全体系结构进行了确定, 这种技术的应用是为了实现硬件及软件的深度解耦。SCA 电台采用开放的标准结构, 通过各种共享的硬件组建以及波形软件的动态加载来实现硬件维护以及软件的功能升级。随着

软件无线电技术的广泛应用, 为实现软件与硬件的无关性, 提高开发效率, SCA 规范逐渐进入了人们的视野并受到了广泛的关注。文献[2]分析了软件无线电波形和波形组件, 提出了一种基于 SCA 规范的波形组件动态部署方法。文献[3]通过研究 SCA 技术设计了指控装备通信接口测试系统软件框架。文献[4]分析了 SCA 环境下常用的中间件技术, 并对 ACE_TAO 和 AvicORB 两种 CORBA 产品的传输速率和传输时延等性能指标进行了测试。文献[5]着重介绍了 SCA 硬件体系结构、软件体系结构和安全体系结构, 分析了其参考价值。文献[6]提出了一种基于 GPP 代理的 SCA 波形管理方法, 解决 DSP 和 FPGA 不能运行 CORBA 的问题。文献[7]针对 SCA 规范提出的 MHAL 和 MOCB 两种硬

收稿日期: 2021-11-08; 修回日期: 2021-12-02。

作者简介: 胡宇(1981-), 男, 四川成都人, 大学本科, 工程师, 主要从事自动测试系统/设备方向的研究。

引用格式: 胡宇, 文永康, 徐卫, 等. 软件无线电硬件平台 MHAL 接口符合性测试方法[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(5): 24-29, 36.

件抽象层标准进行分析, 研究了其实现方案, 并对其特点、优势进行了分析。文献[8]提出了一种多总线结构的 MHAL 路由方法, 解决了传统方法多端口路由以及数据包路由转发的问题。文献[9]研究了 SCA 和补充规范的技术应用, 针对 DSP 和 FPGA 平台设计了硬件抽象层通信接口。文献[10]从基本定义、体系结构、应用和实现等方面分析了 SCA 中的 CORBA 和硬件抽象层技术。

软件无线电技术的核心在于利用软件实现无线电信号产生和处理, 在通用的硬件架构上加载不同软件实现不同的通讯功能^[11]。软件无线电硬件架构中一般包括嵌入式处理器、DSP、FPGA、ADC 和 DAC 等组成部分^[12,17], 软无设备中的“软件”既包括诸如嵌入式处理和 DSP 中运行的 C 程序, 也包括 FPGA 相关的 VHDL 代码。这些软件如何才能重用^[18], 是 SCA 规范需要解决的关键问题。不同的软件无线电平台或设备采用的硬件芯片、接口不尽相同, 导致相应的“软件”不能共用, 为此 SCA 提出了硬件抽象层 (HAL-C, hardware abstract layer connectivity) 的概念^[19]。MHAL 应用程序接口 (modem hardware abstraction layer application program interface) 支持部署在 GPP、DSP 和 FPGA 上的应用程序组件之间的通信^[20], 制定了统一的消息格式和软件接口。基于 SCA 设计的软无硬件平台应具备相应的 API 接口, 供波形软件开发者调用, 让开发者只关注通信波形、算法的设计, 不用考虑具体硬件如何实现。MHAL 是衡量软无硬件平台是否满足 SCA 规范要求的重要标志, MHAL 接口符合性测试是软无设备开发验证的必要环节。

1 MHAL 应用程序接口

1.1 MHAL 工作原理

SCA 将软无硬件平台中的 GPP (通用处理器)、DSP 和 FPGA 定义为 CE (计算单元), MHAL 的作用就是方便 CE 之间的消息传输。MHAL API 没有指定硬件平台中 CE 的数量、数据传输总线和具体架构, 仅指定了消息传输接口协议。MHAL 位于 CE 硬件接口和软件之间, 如图 1 所示。

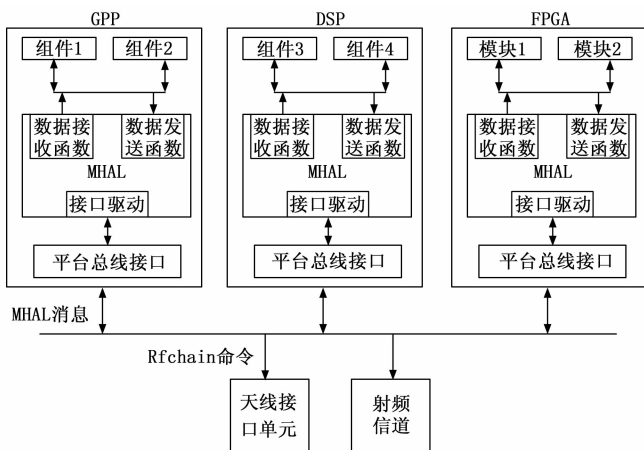


图 1 软无平台典型架构

GPP、DSP 的 MHAL 本质上可以当着平台底层数据传输的驱动, 它按照标准要求提供接口数据收、发函数。FP-

GA 的 MHAL 则是一系列的数据收发节点, 提供用户数据接口, 通过这些节点可以将 FPGA 内部数据推送到平台数据总线上。平台开发者根据平台自身硬件架构、配置开发 MHAL, 软件开发者只需调用相应接口就可以实现各 CE 之间的消息传输, 使波形软件可以在不同平台上完成快速移植。除完成 CE 间的数据通信之外, MHAL 消息还被用于传送 RF Chain 命令, 实现平台天线接口单元、射频信道等资源的控制。MHAL API 包括 GPP API、DSP API、FPGA API 和 RF Chain API 等四大部分。

1.2 MHAL 消息格式

MHAL 消息格式, 包括报头和载荷两部分, 报头包括在用标识、逻辑目的地址和长度, 载荷包括消息 ID 和参数如图 2 所示。

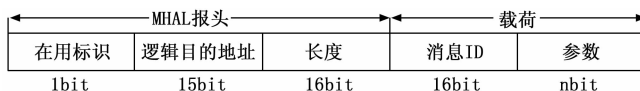


图 2 MHAL 消息格式

“在用标识”: 长度 1 位, 当波形开发方的收、发数据采用共享缓存时, 用于标识接收消息已处理完成。

“逻辑目的地址”: 长度 15 位, 用于指定消息传输的目的地址, 它可以代表一个或一组 DSP 函数和 FPGA 节点, 逻辑目的地址在平台中进行全局定义, 在每个 CE 中具有相同的含义。

“长度”: 长度 16 位, 代表消息长度。

1.3 GPPMHAL 接口

GPP MHAL 被封装成 CORBA 组件, 并定义了一系列端口、服务和接口。MHAL 定义的端口包括“提供者端口”和“使用者端口”, “提供者端口”用于通过 MHAL 发送数据, “使用者端口”用于从 MHAL 接收数据。发送数据时需将设备使用方的“使用者端口”连接到 MHAL “提供者端口”; 接收数据时将设备使用方的“提供者端口”连接到 MHAL “使用者端口”。MHAL 定义的服务包括“提供者服务”和“使用者服务”, “提供者服务”可被其它客户端组件调用, 当 MHAL 作为客户端时可调用“使用者服务”。MHAL 定义了“平台接口” (MHAL:: PF_MHALPacketConsumer) 和“波形接口” (MHAL:: WF_MHALPacketConsumer), “平台接口”供软无设备平台使用, 波形接口用于内部波形和应用程序访问。GPP MHAL 服务、接口及数原型如表 1 所示。

1.4 DSP MHAL 接口

DSP MHAL 由一系列传输 MHAL 消息的 C 函数组成, 在 DSP 波形组件代码中调用执行, 包括通信路由模块和消息在用模块。通信路由模块实现 MHAL 消息发送、接收和路由功能, 消息在用模块实现“在使用”标志控制、查询功能。DSP MHAL 共提供了 6 个接口函数, 详情如表 2 所示。

1.5 FPGA MHAL 接口

FPGA MHAL 由数据发送节点和数据接收节点组成, 以 VHDL 代码模块的形式存在, 使用时需要与 FGPA 中的

波形软件代码共同综合、实现和下载。FPGA MHAL 定义了 1 个发送节点和 5 个接收节点。发送节点采用多深度 FIFO 发送方式，接收节点可选择多深度 FIFO、单深度

FIFO、RAM、N-WORD Register 和 Strobe 等方式。标准对每种节点的总线信号接口制定了数据线、控制线、时钟线、工作时序等，如表 3 所示。

表 1 GPP MHAL 服务及接口

端口	服务/接口	函数	说明
提供者端口 (mhal_consumer_in_port)	MHAL::MHALPacketConsumer	pushPacket()	向接收数据方推送数据包
	MHAL::PF_MHALPacketConsumer	addTxRoute()	保存逻辑目的地址和物理目的地址的映射,用于消息路由
	Packet::PayloadStatus	getMaxPayloadSize()	获取最大负载长度
getMinPayloadSize()		获取最小负载长度	
使用者端口 (mhal_producer_out_port)	MHAL::MHALPacketConsumer	pushPacket()	向接收数据方推送数据包
	MHAL::WF_MHALPacketConsumer	getRxRoutes()	从波形组件中获取逻辑目的地址
	Packet::PayloadStatus	getMaxPayloadSize()	获取最大负载长度
getMinPayloadSize()		获取最小负载长度	

表 2 DSP MHAL 接口函数

序号	模块	函数原型	说明
1	MHAL 通信路由模块	void Mhal_Comm(MhalByte * bufferPtr)	向逻辑目标地址发送 MHAL 消息
2		funPtrrroute_LD_sink(short LD,funPtrnewSinkFx)	为波形指定新的数据接收函数
3		short LD_of(MhalByte * msgPtr)	返回消息逻辑目标地址
4	MHAL 消息在用模块	void setMsgInUse(MhalByte * msgPtr)	设置消息“在使用”标志
5		void clrMsgInUse(MhalByte * msgPtr)	清除消息“在使用”标志
6		boolisMsgInUse(MhalByte * msgPtr)	查询消息“在使用”标志

表 3 FPGA MHAL 接口信号

序号	收/发类型	节点类型	信号名称	信号方向	说明
1	发送节点	Multi-Depth FIFO Tx	WRITE_EN	输入	写数据使能
2			WRITE_EOM_MSB	输入	“1”表明信息结尾为高字节
3			WRITE_EOM_LSB	输入	“1”表明信息结尾为低字节
4			WRITE_DATA	输入	16 位数据总线
5			USER_CLK	输入	数据时钟,上升沿写入
6	接收节点 1	Multi-Depth FIFO Rx	READ_EN	输入	读数据使能
7			USER_CLK	输入	数据时钟
8			READ_FLAG	输出	数据可读标志
9			READ_EOM_MSB	输出	“1”表明信息结尾为高字节
10			READ_EOM_LSB	输出	“1”表明信息结尾为低字节
11			READ_DATA	输出	16 位数据总线
12	接收节点 2	Single-Depth FIFO Rx	USER_CLK	输入	数据时钟
13			USER_DATA_NEW	输出	可获得新用户数据
14			USER_NEXT	输入	前进到下一个数据字
15			USER_DATA	输出	用户指定宽度的数据总线
16			PACKET_SIZE	输出	消息大小
17	接收节点 3	RAM Rx	USER_DATA_NEW	输出	可获得新用户数据
18			USER_CLK	输入	数据时钟
19			USER_ADDR	输入	RAM 地址信号
20			PACKET_SIZE	输出	消息大小
21			USER_DATA	输出	用户指定宽度的数据总线
22	接收节点 4	N-WORD Register Rx	USER_CLK	输入	数据时钟
23			USER_DATA	输出	用户指定宽度的数据总线
22	接收节点 5	Strobe Rx	USER_DATA_NEW	输出	消息到达
23			USER_CLK	输入	数据时钟

表 4 RFChain 常规命令列表

序号	命令名称	符号	功能
1	RFC_DefModulationMode	DEFMODMODE	定义调制模式
2	RFC_ModulationMode	MODMODE	设置调制模式
3	RFC_TxALCAAttackTime	TXALCATTACKTIME	功放 ALC 启动时间
4	RFC_TxALCDecayTime	TXALCDECAYTIME	功放 ALC 衰退时间
5	RFC_TxEnvDecayTime	TXENVDECAYTIME	功放信号包络衰退时间
6	RFC_TxEnvRiseTime	TXENVRISETIME	功放信号包络上升时间
7	RFC_ChannelFrequency	FREQ	设置射频信道频率
8	RFC_ChannelRxModeSet	RXMODE	设置进入接收模式
9	RFC_ChannelTxModeSet	TXMODE	设置进入发射模式
10	RFC_TxPower	TXPOWER	设置发射功率
11	RFC_ChannelTxKeyDisable	TXKEYOFF	关闭发射控制
12	RFC_ChannelTxKeyEnable	TXKEYON	使能发射控制
13	RFC_ConnectTxBlock	CONNECTTXBLOCK	指定发射阻塞响应资源
14	RFC_MasterExecuteNow	MEXECUTE	执行延迟命令
15	RFC_ReceiverGainControl	RXGAIN	设置接收增益
16	RFC_ChannelStandbyModeSet	STANDBYMODE	设置接收模式待命状态
17	RFC_TxBusyStatusRequest	TXSTAT	查询发射资源状态
18	RFC_TxBlocked	TXBLOCKED	发射阻塞, 执行发转收流程
19	RFC_TxBusyStatusResponse	TXSTATRSP	应答发射资源查询指令

1.6 RFChain 接口

RFChain 接口是用于控制平台射频信道的命令集，采用 MHAL 消息的方式进行传输，通过消息 ID 映射 RFChain 命令符号，命令参数封装于消息载荷中。RFChain 命令可设置信道调制参数、调制模式、功放参数、信道频率、收发模式、收发控制、接收增益、信道状态查询等，主要命令如表 4 所示。

2 MHAL 接口符合性测试方法

2.1 基本思路

MHAL 接口符合性测试基本思路为：按标准开发测试组件集，并部署到被测硬件平台中，运行测试用例，调用被测 MHAL 接口传输消息，通过其响应判断被测 MHAL 接口是否符合标准要求。上位机测试软件将被测模块的逻辑地址 LD 和测试数据按 MHAL 协议封装成 MHAL 消息，通过 CORBA 下发 MHAL 消息至被测平台，LD 所指向的测试组件接收消息，并将消息转发到其它测试组件，最后将消息回传至测试终端，如图 3 所示。测试软件将收发数据进行比对，根据比对结果判断 MHAL 接口是否符合要求。

2.2 MHAL 标准符合性测试方法

2.2.1 GPP MHAL 标准符合性测试

GPP MHAL 测试内容包括 ConsumerPort pushPacket、ConsumerPortaddTxRoute、ProducerPort pushPacket、ProducerPortgetRxRoutes。

ConsumerPort pushPacket 测试：通过获取 PF 对象调用 ConsumerPort pushPacket 函数，如果调用成功，没有异常抛出，则测试通过；

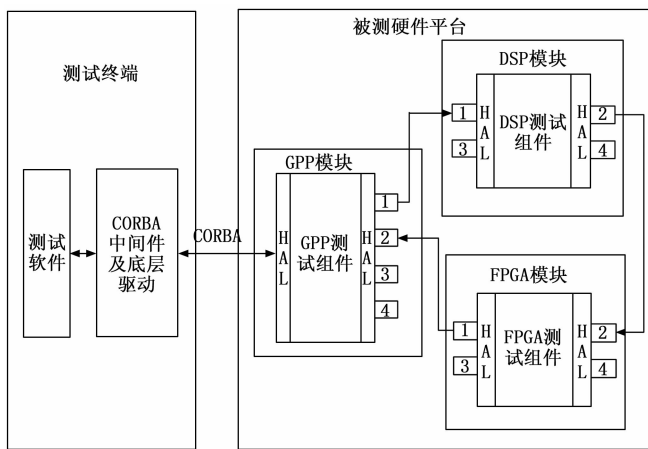


图 3 MHAL 符合性测试信息流向图

ConsumerPortaddTxRoute 测试：通过获取 PF 对象调用 ConsumerPortaddTxRoute 函数，如果调用成功，没有异常抛出，则测试通过。

ProducerPort pushPacket 接口和 ProducerPortgetRxRoutes 接口测试：通过 PC 和 DSP 之间的数据闭环，对接口功能进行测试。接口调用过程如下，PC 通过 ConsumerPort pushPacket 接口和 ConsumerPortaddTxRoute 接口将 MHAL 数据（目的地址为 LDAddr，回执地址为 LDAddrRep）推送至 DSP，DSP 回传数据至 GPP MHAL 设备组件，MHAL 设备组件收到数据后，调用 ProducerPort pushPacket 接口和 ProducerPortgetRxRoutes 接口，将数据推送至 PC。PC 接收该 MHAL 数据，并判断该 MHAL 数据中的 LD 与 LDAddrRep 是否一致，如果一致则测试通过，否则失败。

2.2.2 DSPMHAL 标准符合性测试

DSP-MHAL 标准符合性包括数据接口、LD 获取和 MsgInUse 接口等 3 个测试模块，对应 6 个接口函数如下。

数据接口包括：reroute_LD_sink ()、Mhal_Comm ()；

LD 获取包括：LD_of ()；

MsgInUse 接口包括：isMsgInUse ()、clrMsgInUse () 和 setMsgInUse ()。

测试流程为 DSP 测试用例调用 reroute_LD_sink 完成 LDAddr 的注册；测试终端 PC 按照 ICD 封装 DSP 测试 MHAL 消息包，通过 PF_MHALPacketConsumer::pushPacket 方法将 MHAL 数据推送给 DSP；DSP 测试用例接收并解析该数据包，根据测试项目调用 LD_of ()、setMsgInUse ()、clrMsgInUse () 和 isMsgInUse () 函数，并检查消息包中的标识位，测试其响应；DSP 测试用例将测试结果封装到应答包，调用 Mhal_Comm () 函数发送给 PC；PC 接收并解析 DSP 的应答包，获取测试结果。

2.2.3 FPGA MHAL 标准符合性测试

FPGA MHAL 标准符合性测试包括多深度 FIFO 发送接口、单深度 FIFO 接收接口、多深度 FIFO 接收接口、RAM 接收接口、N-Word 接收接口和 Strobe 接收接口测试。

测试终端 PC 下发 FPGA 接口测试消息给 GPP 模块上的 MHAL 测试组件，GPP MHAL 测试组件将数据转发给 FPGA；FPGA 测试组件调用单深度 FIFO 接收接口、多深度 FIFO 接收接口、RAM 接收接口、N-Word 接收接口和 Strobe 接收接口，接收、解析该 MHAL 数据并判断数据正确性；FPGA 测试组件根据各接口数据接收的正确性生成测试结果，通过多深度 FIFO 发送接口将测试结果上报给 GPP。PC 通过 GPP MHAL 接收来自 FPGA 的应答数据，解析测试结果。

2.3 RFChain 测试方法

RFChain 测试主要针对射频输出响应测试，基本测试方法为通过发送 RFChain 命令设置被测硬件平台信道参数，利用通用仪器、测试用例完成被测硬件平台信道参数指标测试，验证 RFChain 是否正确响应。根据设备工作模式可将 RFChain 输出响应测试分为接收和发射两类。

射频接收类测试：由外部仪器输入激励信号，被测设备作为接收机接收信号，通过设备内部测试用例测量信号参数，包括收信道带宽测试、动态范围测试。

射频发射类测试：被测设备加载测试用例，控制被测设备产生基本波形并发射信号，通过外部仪器测量设备的输出信号参数，包括频率范围测试、频率准确度、发射功率测试、发信道带宽测试和跳频能力测试。

硬件平台 RFChain 输出响应测试系统由测试终端、ATML 测试平台和测试组件组成，如图 4 所示。测试终端是系统控制中心，由主控计算机和测试软件组成，通过以太网总线控制 ATML 测试平台和被测设备、进行数据交

互。ATML 测试平台是面向信号的自动测试系统，由 ATML 软件平台、测试程序 TP、仪器资源和信号适配接口组成。测试组件 1、测试组件 2、测试组件 3 针对测试项目开发，分别部署在 GPP、DSP、FPGA 上。

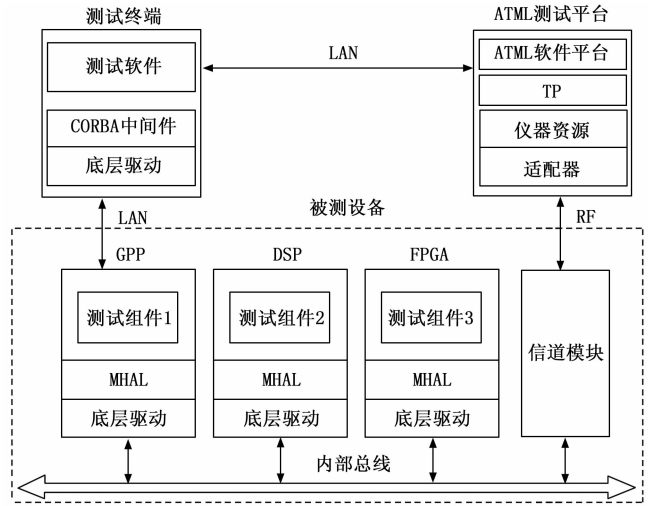


图 4 RFChain 测试系统组成框图

测试组件 1：用于实现核心框架下的建立连接、断开连接、LD 路由配置，以及设备组件的部署、安装、启动、卸载、删除等功能，实现 RFChain 命令的下发。测试组件 2：用于跳频发射能力测试，实现跳频功能，根据跳频图案，控制信道发射频点。测试组件 3：接收测试时接收来自信道的基带数据，并进行抽取滤波，一方面由 GPP 读取该数据并转发给硬件平台控制终端，另一方面可经过 FFT、加窗处理，计算信号功率和信噪比；发射测试时用于产生扩频宽带信号和跳时钟。各测试组件信息总览如表 5 所示。

表 5 测试组件功能一览

组件名称	部署位置	射频接收类测试	射频发射类测试
测试组件 1	GPP	① 被测平台管理 ② 下发 RF Chain 消息	① 被测平台管理 ② 下发 RF Chain 消息
测试组件 2	DSP	不参与	① 跳频频率控制
测试组件 3	FPGA	① 基带数据抽取滤波 ② 信号功率、信噪比测量	① 产生扩频宽带信号 ② 产生跳时钟

3 实验结果与分析

按照图 4 所示搭建测试系统，首先对某单位软无设备平台进行了测试，测试内容包括：LD 遍历、MHAL 接口符合性和 RFChain 输出响应等，各项测试均达到预期效果。随后，对多家其他单位研制的软无设备平台进行测试。由于不同单位的软无平台实现方式不同，测试用例需要分别进行移植。因为实现的功能不同，各被测平台的 RFChain 输出响应指标如发射功率也不尽相同。对于标准中提出的几种 FPGA 接收接口，各单位采用了不同的方式，测试结果对比如表 6 所示。试验结果表明该测试方法能适应 SCA

表 6 软无设备 MHAL 符合性测试对比表

序号	平台类型/测试项目	单位 1	单位 2	单位 3	单位 4	单位 5	
1	平台类型	ZYNQ+FPGA	ARM+DSP +FPGA	POWERPC+DSP +FPGA	DSP+FPGA	ZYNQ	
2	测试用例移植时间	1 小时	1.5 小时	1.5 小时	1 小时	0.5 小时	
3	测试时间	3 分钟	4 分钟	4 分钟	2 分钟	1 分钟	
4	LD 遍历测试	成功返回	成功返回	成功返回	成功返回	成功返回	
5	GPP MHAL 接口测试	ConsumerPortpushPacket	成功调用	成功调用	成功调用	成功调用	
6		ConsumerPortaddTxRoute	成功调用	成功调用	成功调用	成功调用	
7		ProducerPortpushPacket	成功返回	成功返回	成功返回	成功返回	
8		ProducerPortgetRxRoutes	成功返回	成功返回	成功返回	成功返回	
9	DSP MHAL 接口测试	MhalComm	成功返回	成功返回	成功返回	成功返回	
10		reroute_LD_sink	成功调用	成功调用	成功调用	成功调用	
11		LD_of	成功调用	成功调用	成功调用	成功调用	
12		setMsgInUse	设置成功	设置成功	设置成功	设置成功	
13		clrMsgInUse	清除成功	清除成功	清除成功	清除成功	
14		isMsgInUse	查询成功	查询成功	查询成功	查询成功	
15	FPGA MHAL 接口测试	多深度 FIFO 发送	发送成功	发送成功	发送成功	发送成功	
16		多深度 FIFO 接收	接收成功	接收成功	接收成功	接收成功	
17		单深度 FIFO 接收	接收成功	接收成功	接收成功	接收成功	
18		RAM 接收	接收成功	接收不成功	接收不成功	接收成功	接收成功
19		N-Word 寄存器接收	接收成功	接收不成功	接收不成功	接收不成功	接收成功
20		Strobe 接收	接收成功	接收成功	接收不成功	接收不成功	接收不成功
9	RFChain 输出响应 测试	收信道带宽	200 k	800 k	50 M	1 M	250 k
10		动态范围	105 dB	100 dB	110 dB	95 dB	100 dB
11		频率范围	xxx~xxxMHz	xxx~xxxMHz	xxx~xxxMHz	xxx~xxxMHz	xxx~xxxMHz
12		频率准确度	1×10^{-6}	0.5×10^{-6}	0.5×10^{-6}	1×10^{-6}	1×10^{-6}
13		发射功率	21 dBm	54 dBm	35 dBm	41 dBm	45 dBm
14		发信道带宽	200 k	800 k	50 M	1 M	250 k
		跳频能力	测试通过	测试通过	测试通过	测试通过	测试通过

不同硬件架构下的 MHAL 符合性测试, 测试组件/用例具有良好的兼容性, 可快速移植到不同的软无系统平台上。

4 结束语

SCA 是软件无线电技术发展应用的里程碑技术, 无论是对通信装备的通用化、标准化推进, 还是对民用通信产业的发展都能够起到至关重要的推动作用。硬件平台 SCA 符合性测试与软件运行环境标准符合性测试、波形 SCA 标准符合性测试、波形传输性能符合性测试、波形组网性能符合性测试、安全可信性能符合性测试共同形成了软无设备的测试体系。MHAL 作为 SCA 关键技术之一, 在整个技术体系中占据举足轻重的地位, 是实现软件与硬件解耦的必要条件。在 MHAL 设计过程中, 不同设计者对标准理解不同, 采用的实现途径不同, 需要采用统一的方法、标准对其符合性进行衡量。目前, 国内学者在 SCA 的研究主要集中在设计和实现等方面, 鲜有文献报道 SCA MHAL 标准符合性测试方法相关研究。在此之前本单位对于 MHAL 的测试验证主要采用人工代码走查和手动测试的方式, 测试一致性差且效率低, RFChain 响应测试覆盖不全, 不能实

现接收性能测试。本方法针对 MHAL API 接口和 RFChain 指令两个方面, 创新性提出软件测试和硬件测试相结合的方式, 通过开发标准的测试用例, 移植到被测平台并运行, 对被测软无硬件平台进行全面的测试验证。基于 ATML 自动测试, 测试可信度高、速度快, 测试效率提高了 10 倍以上。经过对多家单位软无设备的测试, 验证了测试方法的可行性、有效性。实践表明该方法准确度高、兼容性强、适用范围广, 可应用于软无设备的设计验证、测评、验收和检验等环节, 具有一定的推广意义。

参考文献:

- [1] 赵秋明, 林志堂, 杨莹莹, 等. 基于 SCA 的小型化核心框架研究 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 10 (5): 1145-1147.
- [2] 石贱弟, 赵小璞, 陈俊可. 一种基于软件通信体系结构的波形组件动态部署方法 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (9): 3058-3060.
- [3] 袁 扬, 谭月辉, 孙慧贤, 等. 指控装备通信接口可重构测试系统软件框架设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (1): 153-155.

(下转第 36 页)

参考文献:

- [1] LIU Y, LI Y, LIN S W, et al. ModCon: A model-based testing platform for smart contracts [C] //Proceedings of the 28th ACM Joint Meeting on European Software Engineering Conference and Symposium on the Foundations of Software Engineering. 2020: 1601-1605.
- [2] MERIEM A, ABDELAZIZ M. A Methodology to do Model-Based Testing using FMEA [C] //Proceedings of the 2nd International Conference on Networking, Information Systems & Security. 2019: 1-11.
- [3] YOUSAF N, AZAM F, BUTT W H, et al. Automated model-based test case generation for Web user interfaces (WUI) from interaction flow modeling language (IFML) models [J]. IEEE Access, 2019, 7: 67331-67354.
- [4] 梁卓杰. 测试用例自动生成算法设计及自动化测试平台构建 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [5] 刘艳平, 李海浩. 基于序列图和状态图的软件测试用例生成方法 [J]. 电子设计工程, 2019, 27 (24): 167-170, 175.
- [6] 侯俊, 周红, 马春燕, 等. 面向 WEB 服务的测试用例自动化生成方法 [J]. 西北工业大学学报, 2018, 36 (1): 149-155.
- [7] 边耐政, 张琳. 一种基于 Selenium 的 Web 自动化测试低耦合框架 [J]. 计算机应用与软件, 2014, 31 (8): 13-16, 37.
- [8] 单攀攀. 一种基于 Selenium 与 Unittest 的 Web 自动化测试框架 [J]. 信息技术与网络安全, 2021, 40 (9): 77-80.
- [9] 缪准扣, 陈圣波, 曾红卫. 基于模型的 Web 应用测试 [J]. 计算机学报, 2011, 34 (6): 1012-1028.
- [10] 曾红卫. Web 应用的验证与测试方法研究 [D]. 上海: 上海大学, 2008.
- [11] 张毅伟, 贲可荣. 基于状态图测试的迁移路径生成方法 [J]. 计算机科学与探索, 2019, 13 (6): 961-972.
- [12] 陈小林. 基于 UML 模型的测试用例自动生成综述 [J]. 现代计算机 (专业版), 2018 (7): 61-65.
- [13] 张 建. 基于模型驱动的自动化测试平台相关技术研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2017.
- [14] 尹建月, 周 萌, 陈升来. 基于 UML 活动图的测试用例生成方法设计 [J]. 信息化研究, 2014, 40 (3): 28-32.
- [15] 齐 磊. 基于 UML 的 Web 应用测试方法的研究与应用 [D]. 北京: 北京工业大学, 2012.
- [16] 王 军, 孟凡鹏. 基于关键字驱动的自动化测试研究与实现 [J]. 计算机工程与设计, 2012, 33 (9): 3652-3656.
- [17] 康新欣. 基于关键字驱动的移动端自动化测试平台的设计与实现 [D]. 北京: 北京工业大学, 2019.
- [18] 章鸽鸽. 基于关键字驱动的自动化测试工具的设计与实现 [D]. 合肥: 安徽大学, 2018.
- [19] 孙婧鑫. 基于 Selenium 的 Web 功能自动化测试框架的设计与实现 [D]. 西安: 西安石油大学, 2021.
- [20] 杨 静. 自动化测试平台的设计与实现 [D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [21] 陈江勇, 许 力, 张 辉, 等. Web 自动化测试框架的设计与实现 [J]. 福建师范大学学报 (自然科学版), 2013, 29 (4): 39-45.
- [22] 万 琳, 廖飞雄. 一种分层结构测试脚本技术 [J]. 计算机系统应用, 2011, 20 (7): 141-145.
- ~~~~~
- (上接第 29 页)
- [4] 姚斯可, 刘 龔. 软件通信体系结构 CORBA 中间件应用及指标评测 [J]. 航空电子技术, 2020 (2): 37-43.
- [5] 朱 娇, 祝颂东, 阮轶杰. 外军软件通信体系结构规范 [J]. 电子技术与软件工程, 2020 (7): 18-20.
- [6] 赵 蕾. SCA 异构平台系统波形部署技术研究及实现 [J]. 通信技术, 2020, 53 (5): 1157-1162.
- [7] 王彦刚, 吕遵明, 万留进. 基于 SCA 规范的硬件抽象层应用程序接口分析 [J]. 计算机应用, 2014, 34 (S2): 219-223.
- [8] 邵 龙. 多总线结构 MHAL 路由方法 [J]. 电讯技术, 2020, 60 (10): 1228-1232.
- [9] 钟 瑜. 通用信号处理中的硬件抽象层连接设计 [J]. 电讯技术, 2011, 51 (6): 46-50.
- [10] 崔晓鹏, 胡中豫, 张 豪. SCA 中 CORBA 与硬件抽象层技术研究 [J]. 现代电子技术, 2011, 34 (6): 32-35.
- [11] 林 婧, 王 宏, 方 炜. 软件无线电的研究现状综述 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (10): 2332-2350.
- [12] 张 迪, 韩 爽. 基于软件无线电平台的中频信号处理系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (11): 220-223.
- [13] 高英明, 陈建云, 唐银银. 基于 SOC 架构软件无线电平台的低轨卫星载荷接收信号模拟技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (11): 3724-3730.
- [14] 郭 敏, 庄信武, 王向东, 等. 基于软件无线电架构的手持式频谱仪硬件设计 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (1): 296-299.
- [15] 高竞之, 郭兴龙, 姚金杰, 等. 基于软件无线电的基带调制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (12): 3289-3291.
- [16] 邱 雅, 郭东恩. 一种基于软件无线电的中频数字接收机的设计实现 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (4): 1070-1075.
- [17] 刁郑虎, 年夫顺, 樊晓腾, 等. 基于 FPGA 的多制式基带信号发生器设计 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (10): 2584-2586.
- [19] 石贱弟, 赵小璞. 基于软件通信体系结构的 DSP 硬件抽象层研究与设计 [J]. 电子设计工程, 2011, 19 (17): 123-125.
- [20] Joint Tactical Radio System (JTRS) Joint Program Office. Modem Hardware Abstraction Layer Application Program Interface [S]. MHAL API V2.13.2. USA: JTRS Joint Program Office, 2013.