

引用格式: 阎芳, 李哲玮, 田毅, 等. 基于 UVM 的多通路航空总线收发器 IP 验证[J]. 电光与控制, 2018, 25(1): 70-73. YAN F, LI Z W, TIAN Y, et al. UVM based verification for IP of multi-channel aviation bus transceiver [J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(1): 70-73.

基于 UVM 的多通路航空总线收发器 IP 验证

阎芳, 李哲玮, 田毅, 范毓洋

(中国民航大学民用航空器适航审定技术与管理研究中心, 天津 300300)

摘要: 面对机载 SoC 设计, 传统验证效率低、可重用性差, 难以满足航空实际应用环境验证需求, 采用 UVM 高级验证方法学, 使用“寄存器模型后门访问”方法控制参考模型期望值输出, 搭建适用于多通路航空总线收发器 IP 核的验证平台及验证环境, 并实现对其数据收发及格式转换和多通路数据轮巡仲裁等功能验证。验证结果表明, 该测试平台具有较好的可重用性, 能够满足航空实际应用验证需求, 缩短了机载电子硬件开发周期。

关键词: 多通路航空总线; 收发器; UVM; 寄存器模型; 可重用性

中图分类号: TN402 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.01.015

UVM Based Verification for IP of Multi-channel Aviation Bus Transceiver

YAN Fang, LI Zhe-wei, TIAN Yi, FAN Yu-yang

(Civil Aircraft Airworthiness Certification Technology and Management Research Center, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Considering that in airborne SoC design, the traditional verification platform has low efficiency, poor reusability, and is difficult to meet the practical aviation verification needs, we used advanced verification methodology of Universal Verification Methodology (UVM) and the “register model backdoor access” method to control the expected output of the reference model, and constructed a test platform and verification environment for test of the IP core of the multi-channel airborne bus transceiver. Thus the function verification of data receiving and sending, format conversion and multi-channel data patrolling is realized. The verification results show that the test platform has good reusability, which can meet the requirement of aviation application verification and shorten the airborne electronic hardware development cycle.

Key words: multi-channel aviation bus; transceiver; UVM; register model; reusability

0 引言

随着机载集成电路越来越多地采用 SoC (System on Chip) 架构进行设计, 在面对有大量 IP 核集成的 SoC 验证时, 传统的基于 Verilog 语言的验证平台结构单一、验证效率低。在模拟航空实际应用环境中多路数据同时处理时, 验证通用性差难以扩展、重用及维护。因此, 芯片的验证越来越关注于提高验证环境的高效性与可重用性。

UVM (Universal Verification Methodology) 验证方法学由 Accellera 组织于 2010 年推出, 它是吸收了 OVM, VMM 和 AVM 等众多当前主流验证方法学优点的成熟开源方法学^[1]。工程师采用此验证方法可以大幅缩短验证工作所需时间, 降低成本, 加速上市从而提升产品竞争力, 同时, UVM 方法学可以通过设置寄存器模型, 配置或读取待测设计中的某些寄存器, 从而更好地模拟或控制待测设计的内部运行机制, 能够准确方便地模拟航空实际应用环境, 相较于传统验证极大地缩小了验证工作量。

1 多通路航空总线收发器 IP 核

在现代飞机上, 多采用 ARINC429 总线进行通信, 同时随着 SoC 架构在机载集成电路的逐渐使用, 将片

收稿日期: 2017-02-16 修回日期: 2017-09-18

基金项目: 天津市自然科学基金联合资助项目 (15JCQNJC42800); 中央高校基本科研业务费中国民航大学资助 (3122017090)

作者简介: 阎芳 (1982—), 女, 山东烟台人, 硕士, 副研究员, 研究方向为机载电子软件适航技术。

上数据总线融入机载芯片设计也变得越发常见,因此,根据 ARINC429 总线规范与 APB 片上外设数据总线协议^[2],设计 ARINC429 多通路总线收发器,同时为满足多路数据收发的航空实际应用需求,使用片上数据总线与多个机载设备的通信,使多通路航空总线数据能够更快地处理与交互,同时采用模块化设计并将其 IP 化,便于复用。多通路总线收发器设计如图 1 所示。

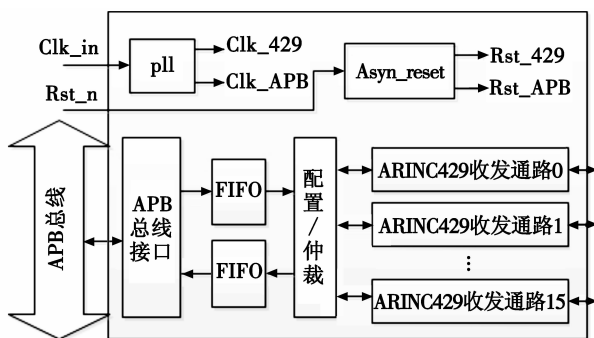


图 1 ARINC429 多通路总线收发器设计框图

Fig. 1 Schematic of ARINC429 multi-channel bus transceiver

ARINC429 多通路总线收发器主要包括 APB 总线接口模块、配置/仲裁模块、异步复位模块和分频器(Asyn_reset&pll)、16 个 ARINC429 总线数据收发通路,具体功能包括: 1) 实现全局异步复位;2) 高速、低速两种通道数据收发模式;3) 跨时钟域数据的读写;4) 循环、顺序两种通道数据收发方式;5) 收发通路正确接收或发送 APB 总线协议格式数据;6) 收发通路正确处理接收或发送 ARINC429 总线协议格式数据;7) APB 协议数据到 ARINC429 协议数据的正确转换;8) ARINC429 协议数据到 APB 协议数据的正确转换;9) 通过接收的 APB 格式数据对发送通道进行配置,决定某个通路发送数据;10) 通过仲裁模块对多通路接收的 ARINC429 数据进行仲裁,决定数据的发送顺序。

2 UVM 验证平台实现

2.1 UVM 验证平台构件简介

传统验证平台一般采用驱动器(Driver)产生激励,并使用监视器(Monitor)检测 DUT 的输出,后将检测结果送至计分板(Scoreboard)与参考模型(Reference Model)给出的预期值进行对比,二者结果完全符合,计分板就显示测试通过,否则测试失败。在 UVM 验证方法中,Driver, Monitor, Reference Model, Scoreboard 等组成部分都是由一个基于 System Verilog 的类(Class)来实现的,通过 UVM 预先设定的类 Uvm_Component 派生出各功能组件,完成驱动、监视等任务^[3]。所谓 UVM 的树形结构就是以这种类派生的形式,将每个部件有机连接在一起,使结构更清晰,操作更简便,如图 2 所

示,整个验证平台就好像一棵倒立的树^[4]。

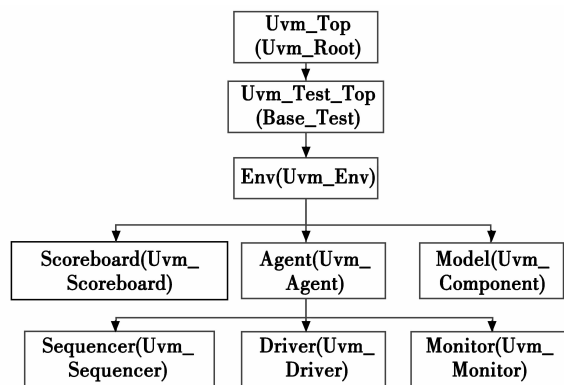


图 2 UVM 树型结构图

Fig. 2 Tree structure of UVM

图 2 中的 Sequencer 和 Agent 是 UVM 中两个特殊组件,在 UVM 中 Sequencer 负责启动 Sequence,并从 Sequence 中获得激励数据从而将数据传输至 Driver,由 Driver 负责驱动 DUT。Sequence 类似于枪膛里的子弹,当 Sequencer 将其启动射击获得数据之后,它的生命周期就结束了。Driver, Monitor 和 Sequencer 在 UVM 方法学中并不是独立存在,而是由一个 UVM 的特殊组件将它们封装在一起,这就是 Agent。一般来说验证平台的数据交换格式和方式由 Driver, Monitor 决定,而 UVM 通过 Agent 来实现这些物理接口协议^[5]。UVM 并不限制 Agent 个数,在一个验证平台中可以使用一个或多个 Agent,并对应多个不同的 Sequence,每个 Agent 都可以独立驱动和采样 DUT。Env 是一个容器类,验证平台通过引入 Env 将以上所有已定义的组件实例化。

2.2 实际验证平台

结合 UVM 验证平台的逻辑结构与 ARINC429 多通路总线收发器 IP 核的各种运行模式,搭建基于 UVM 方法学结构的完整验证平台,图 3 为此验证平台的结构。

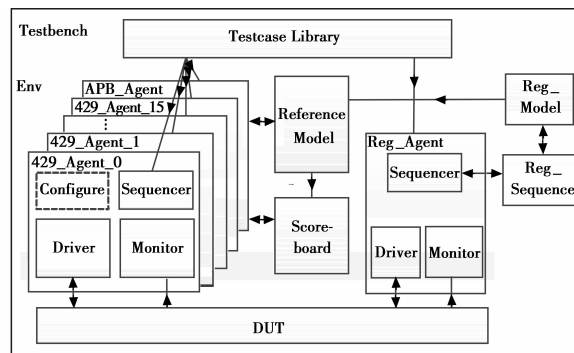


图 3 基于 UVM 的 ARINC429 多通路总线收发 IP 核验证平台

Fig. 3 UVM based ARINC429 multi-channel bus transceiver IP core verification platform

在图 3 中,由于 DUT 有 16 个 ARINC429 总线数据收发通道,所以在验证环境中例化了 16 个 429_Agent,每

个 429_Agent 都可以独立地驱动一个 ARINC429 数据收发通道并进行输出采样, APB_Agent 负责驱动和采样 DUT 中 APB 数据的收发。Scoreboard, Reference Model 和 Agent 等组件通过 TLM 相互传输数据, 在 Scoreboard 中将 Reference Model 模拟的期望值与 Agent 采样的实际输出作对比从而判断此次验证的正确性, 若相同则打印 Right, 否则打印 Wrong。Testcase Library 中包含了用户编写的测试用例 (Testcase), 这些测试用例可以调用 Sequencer 中对应的 Sequence 对多通路 ARINC429 数据和 APB 数据做随机约束, 从而得到期望激励。还可以根据后续的需求添加扩充测试用例库的用例, Testcase 根据 Configure 来配置验证平台的行为方式, 例如数据接收间隔时间, 复位时间等。接下来将详细介绍 Reg_Model 寄存器模型。

2.3 寄存器模型

由于本文中待测设计仲裁模块采用轮询机制对多通路数据传输请求进行仲裁, 参考模型在模拟输出期望值时存在数据排序问题, 例如后接收数据先发送或多通路同时接收数据的传输排序等, 而在 UVM 中可以采用寄存器模型读取 DUT 中某些寄存器的值, 例如仲裁器中的通路选择寄存器, 将读取的值传输给参考模型从而确定传输数据顺序, 这样极大地减小了工作量, 提高了验证效率。两种寄存器读取方式见图 4。

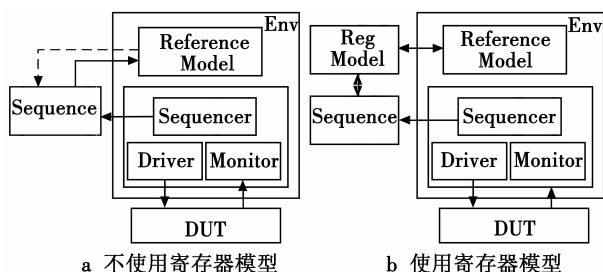


图 4 两种寄存器读取方式

Fig. 4 Two kinds of register reading modes

如图 4 所示, 在不使用寄存器模型情况下, 想要读取 DUT 中某个寄存器, 只能通过设置一个全局事件, 并在 Reference Model 中触发此事件后启动一个 Sequence 读取寄存器的值再传输给 Reference Model。这种方法不仅复杂且在参考模型中难以控制 Sequence。使用寄存器模型后可以由寄存器模型进行寄存器数据读取, 无需由参考模型直接控制, 缩减了工作量, 且寄存器模型可以进行多个寄存器数据读写, 更具有拓展性。前门 (FrontDoor) 访问是寄存器模型读取寄存器的一种方法, 它是首先通过模拟主机 (Master) 在总线上发出读命令, 然后进行读写操作并持续消耗仿真时间, 而另一种方法后门 (BackDoor) 访问直接通过层次化的引用来进行寄存器读写操作, 并且只消耗运行时间不消耗仿真时

间^[6]。本文采用后门访问方式读取仲裁模块中通路选择寄存器的值来进行参考模型期望输出值排序, 如图 3 所示, 通过 Reg_Agent 与 Reg_Sequence 将寄存器的值传输给寄存器模型, 参考模型读取寄存器模型进行期望值排序。寄存器模型定义如下:

```
class reg_model extends uvm_reg_block;
  rand reg_more2one more2onepath;
  virtual function void build();
  ...
  more2onepath = reg_more2one::type_id("more2onepath", this)
  more2onepath.configure(this, null, "more2one_path");
  more2onepath.build();
  ...
endfunction
...
endclass
```

以上代码将定义好的寄存器在 Reg_Block 派生类定义的 Build 函数中实现实例化, Configure 函数主要指定寄存器进行后门访问操作时的路径参数。在参考模型中使用 Read 函数读取寄存器的值, 其函数读取方式设定为 UVM_BackDoor, 通过读取寄存器的值确定参考模型期望值输出的顺序, 最后在 Testbench 中集成寄存器模型, 使用 Set_Hdl_Path_Root 函数设置根路径, 自此完成了寄存器模型的定义与集成。

3 测试运行及结果

3.1 测试运行

IP 核设计的测试激励由多通路 ARINC429 收发通道的数据发送与接收以及 APB 总线接口接收并发送数据两大部分组成。整个验证计划并行模拟多通路 ARINC429 总线和 APB 总线两部分激励, 先进行定向测试, 然后进行随机测试, 以保证整个测试的充分性和可复现性。

使用 QuestaSim10.0b 对 IP 核进行仿真测试。根据需求捕获阶段所确定的功能需求, 编写了 12 个测试用例, 如表 1 所示。

表 1 测试用例列表

Table 1 List of test cases

测试用例	测试项描述
Testcase1	通道速率为高速的直接测试
Testcase2	通道速率为低速的直接测试
Testcase3	发送循环数据的直接测试
Testcase4	发送立即数据的直接测试
Testcase5	APB 数据接收格式错误的直接测试
Testcase6	数据接收校验位错误的直接测试
Testcase7	ARINC429 数据接收格式错误的直接测试
Testcase8	ARINC429 数据接收间隔错误的直接测试
Testcase9	多通路 ARINC429 数据同时接收直接测试
Testcase10	多通路 ARINC429 数据接收随机测试
Testcase11	APB 数据接收随机测试
Testcase12	随机测试

3.2 测试结果

按照验证计划,先进行9个直接测试案例,其中,多通路ARINC429数据同时接收直接测试波形如图5所示,然后再进行3个随机测试案例。

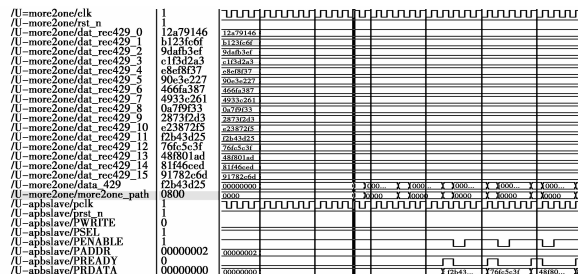


图5 测试仿真波形图

Fig.5 Test simulation waveforms

由图5可以看出,此测试案例中16路通道同时接收ARINC429数据,在同一时刻传输给仲裁模块,仲裁模块采用轮询机制对16路数据进行排序传输。此案例测试结果显示没有错误与警告,打印信息截取如下:

```
...
UVM_INFO ../tb/Scoreboard/Scoreboard.sv (82) @ 49350078:
uvm_test_top.Testcase9.env.scb[Scoreboard] expect output and DUT's
output compare right!
...
```

如上打印信息显示在Scoreboard中期望值与实际输出对比正确,证明验证平台完整地模拟了从多通路数据接收到轮询仲裁到数据发送的过程,成功验证了DUT以及所使用寄存器模型的正确性。

本测试平台还利用SVA断言进行设计查错并结合覆盖率驱动验证明确验证指标,提升了验证效率。所有测试案例的测试结果显示,本文采用基于UVM验证方法学搭建的验证平台高效地完成了针对基于APB

总线接口的多通路航空总线收发器IP核的功能验证,验证其满足功能需求。

4 结束语

本文以对ARINC429多通路总线收发器IP核的验证为例,介绍了基于UVM高级验证方法学的测试平台实现,采用“寄存器模型后门访问”方法读取待测设计中通路选择寄存器以控制参考模型期望值排序,完成了对基于APB总线接口的多通路航空总线收发器IP核有效的功能验证。该验证环境可以集成和拓展至芯片或系统级验证环境中,使APB接口事务、ARINC429收发通路事务和寄存器模型可以在顶层验证中应用,做到了可重用验证,功能及代码覆盖率达到要求,证明UVM方法学能够简便准确地模拟航空实际应用环境,为其在航空电子设计验证的推广提供了参考。

参考文献

(上接第59页)

- [27] TIAN F M, XU D J, ZHAO Y X, et al. Underwater vehicle terrain navigation based on maximum likelihood estimation[C]//Proceeding of the IEEE International Conference on Information and Automation, 2008:1268-1273.
- [28] CHEN S J, LUOH L. 2-D TERCOM guidance-neural net approach[C]//The 10th International Symposium on Pervasive Systems, Algorithms and Networks, 2009: 438-441.
- [29] XIONG L, XIAO L W, DAN B B, et al. Full tensor gravity gradient aided navigation based on nearest matching neural network[C]//Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference, 2013:462-465.
- [30] YANG Z, ZHU Z, ZHAO W. A triangle matching algorithm

- [1] 谢峥,王腾,雍珊珊,等.一种基于UVM面向RISC CPU的可重用功能验证平台[J].北京大学学报:自然科学版,2014,50(2):221-227.
- [2] 夏欢.基于APB的UARTIP核设计与UVM验证[D].南京:南京航空航天大学,2014.
- [3] SPEAR C. SystemVerilog for verification[M]. New York: Springer, 2006.
- [4] 吴星星.基于UVM的SPI接口IP核的验证平台设计[D].合肥:安徽大学,2016.
- [5] 孙铮.基于UVM验证方法学的AES IP验证[J].电子科学技术,2014,1(1):26-30.
- [6] 张强. UVM实战[M].北京:机械工业出版社,2014.

- for gravity-aided navigation for underwater vehicles[J]. Journal of Navigation, 2014, 67(2):227-247.
- [31] ZHU Q, WU B, TIAN Y X. Propagation strategies for stereo image matching based on the dynamic triangle constraint[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2007, 62(4):295-308.
- [32] 汤郡郡.结合地形和环境特征的水下导航定位方法研究[D].南京:东南大学,2015.
- [33] KWON T B, SONG J B, JOO S H. Elevation moment of inertia:a new feature for Monte Carlo localization in outdoor environment with elevation map[J]. Journal of Field Robotics, 2010, 27(3):371-386.
- [34] 冯炜,张静远,谌剑.基于UKF的水下地形匹配算法组合[J].船电技术,2014,34(2):57-61.
- [35] 赵龙.鲁棒惯性地形辅助导航算法研究[J].物理学报,2012,61(10):231-237.