

宽带微功率 MAC 层一致性测试系统设计与实现

江 蓓, 岳桂君, 周 欣

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘 要: 为应对智能电网发展要求, 国家电网正在研究宽带微功率技术, 旨在提高电网通信的传输速率和实时性。为保证协议开发的准确性, 需要进行一致性测试, 确保后期各产商生产的宽带微功率设备能够互联互通。因此, 设计了一种针对宽带微功率 MAC 层的一致性测试系统, 并详细讲解了系统的软硬件设计。最后对系统的功能和性能进行验证, 验证结果表明, 该一致性测试系统已满足各项要求, 可实现对宽带微功率 MAC 层的一致性测试。

关键词: 宽带微功率; 一致性测试; MAC 层; 测试系统

中图分类号: TN915

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.222823

中文引用格式: 江蓓, 岳桂君, 周欣. 宽带微功率 MAC 层一致性测试系统设计与实现[J]. 电子技术应用, 2022, 48(10): 48-53.

英文引用格式: Jiang Bei, Yue Guijun, Zhou Xin. Design and implementation of MAC layer conformance test system of broadband micro-power[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(10): 48-53.

Design and implementation of MAC layer conformance test system of broadband micro-power

Jiang Bei, Yue Guijun, Zhou Xin

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: The State Grid of China is researching broadband micro-power technology to response the development requirements of smart grid and improve the transmission rate and real-time performance of grid communication. In order to ensure the accuracy of the protocol development, a conformance testing should be conduct to ensure that the broadband micro-power equipment produced by various manufactures can be interconnected. Therefore, a conformance testing system for the MAC layer of the broadband micro-power was designed in this thesis and the hardware and software design of the test system were explained in detail. Finally, the system was verified from function and performance. The verification results show that the conformance testing system has met all the requirements and can realize the conformance testing of the MAC layer of the broadband micro-power.

Key words: broadband micro-power; conformance test; MAC layer; test system

0 引言

智能电网在应对全球气候变化, 促进世界经济可持续发展等方面具有重要的作用, 是未来新型电网的基本模式^[1-2], 其网络安全对保障国家重要设施安全具有关键作用^[3]。

用户用电信息采集系统是智能电网完成用电数据采集、电网状态监测等功能的实现载体^[4], 该系统的本地通信方式主要有 RS485 通信、电力线载波通信、微功率无线通信等^[5-6], 但随着电力需求的快速增长, 这些通信方式已难以满足保证海量数据安全、信号高速传输、网络升级灵活的要求^[7]。因此, 国家电网开始研究宽带微功率(Broadband Micro-power, BMP)无线通信技术, 该技术具有高带宽、高速率、高稳定性等优点, 可实现数据

的高速和高实时性传输。

为避免协议开发过程中的二义性理解^[8], 保证各协议实现之间能够互联互通, 需要进行一致性测试。而良好的一致性测试系统能够使测试工作更高效, 所以设计实现一种适用于宽带微功率 MAC 层的一致性测试系统对验证协议开发的准确性至关重要。

文献[9]介绍了一种基于 TCL(Tool Command Language)脚本设计的自动化测试系统, 并使用虚拟操作系统模拟器 QEMU(Quick Emulator)模拟 ARM 芯片, 来加载待测的电力微功率协议栈, 节约了测试成本, 但该系统对协议实现的时隙性能测试无法覆盖; 文献[10]基于 TTCN-3 框架设计了一种宽带 PLC 一致性测试系统, 为 PLC 设备的互操作性奠定了基础, 但测试步骤较为复杂; 文献[11]

设计了针对宽带电力线载波的一致性测试集和测试系统,实现了高层协议的一致性测试,但未针对 MAC 层测试详细分析。

本文首先介绍了宽带微功率协议和一致性测试相关概念,然后对宽带微功率 MAC 层一致性测试系统进行设计,最后对系统进行验证及分析。

1 宽带微功率协议

1.1 协议栈架构

宽带微功率网络中包含中央协调器(Center Coordinator, CCO)、代理协调器(Proxy Coordinator, PCO)和站点(Station, STA)这 3 种类型的通信设备,其中 CCO 安插在集中器中,STA 安插在电能表中。在宽带微功率网络中,CCO 为网络的中心,PCO 是中继代理,STA 则作为普通节点连接在 CCO 或 PCO 上。

宽带微功率协议栈架构如图 1 所示,其中应用层定义了 CCO 和 STA 之间各种业务的数据交互过程;数据链路层包括网络管理子层(NWK 层)和媒体访问控制层(MAC 层),NWK 层的功能有网间协调、组网及网络维护等,MAC 层主要用于完成数据处理过程,并对网络中的时隙进行规划管理;物理层包括发送端和接收端两个部分,发送端对发送数据进行编码调制,接收端对接收数据进行解调和译码。

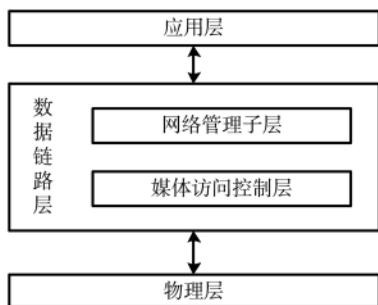


图 1 宽带微功率协议栈结构

1.2 MAC 层功能

宽带微功率 MAC 层有 8 个主要功能,分别如下:

(1)信标机制是指 MAC 层会根据自身站点角色及需求,生成对应的中央信标、代理信标或发现信标,且其中都携带了 CCO 对时隙的规划信息,以此来触发网络中未入网的 STA 申请入网。

(2)时隙管理是指一个信标周期中包含信标时隙、TDMA 时隙、CSMA 时隙和绑定 CSMA 时隙,为实现对时隙的统一管理,CCO 会进行时隙规划并将规划信息填充到中央信标帧中,PCO 和 STA 接收到中央信标帧后,即可根据时隙规划信息对信道进行访问。

(3)信道访问是指在 CSMA 时隙中,站点在竞争信道时可能会在同一时刻发送报文,从而产生时隙冲突。故在对 CSMA 信道访问时,MAC 层会进行基本的冲突判断和退避后再占用信道发送报文。

(4)数据处理是指 MAC 层会在发送 MAC 帧时将其分片成多个小的物理块体,进而生成或短 MPDU(MAC Protocol Data Unit)传输,在接收 MAC 帧时再对物理块体进行重组获得原始的 MAC 帧。

(5)选择确认重传是由于站点发送业务帧时会指定站点进行回应,故指定站点接收到业务帧后会回复表明接收情况的 SACK(Selective Acknowledgement)帧,便于发送站点根据 SACK 帧判断站点是否接收完全。

(6)报文过滤是指 MAC 层会根据报文中的某些字段判断其是否是重复报文,若是则不再处理该报文。

(7)单播/广播是指报文的两种传播方式,单播方式下报文中指定了接收站点,其他站点可不进行处理,广播方式下所有站点都需进行处理,MAC 层会在 MPDU 帧控中填充“广播标志位”字段来区分这两种模式。

(8)时间同步是为了使网络中设备同步到一个统一的时间,实现对时隙的统一管理。MAC 层会在信标帧中填充 BTS(Beacon Time Stamp)字段,STA 收到后可根据 BTS 进行时间同步,将自身时间向 CCO 对齐。

2 协议一致性测试

一致性测试不需要了解协议的内部实现,只是从协议的外部行为来判断协议实现是否符合要求,是保证协议实现质量的必不可少的手段^[12-13]。根据控制观察点的不同,在 ISO 9646^[14]中定义了 4 种不同的抽象测试方法,其中本地测试法架构如图 2 所示。

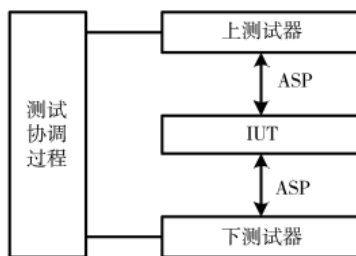


图 2 本地测试法

图 2 中,IUT(Implementation Under Test)是被测实体,ASP(Abstract Service Primitives)是协议层间的服务原语。本地测试法可以将上下测试器集成到一个程序中,比较适合用于研发阶段。在一致性测试过程中,本地测试法能够更容易地完成对上下测试器的协调,从而达到简化测试过程的目的^[15]。

3 测试系统设计

通过对 MAC 层功能进行分析,总结出宽带微功率 MAC 层一致性测试系统存在的设计难点主要包括如何保证时间准确性、如何对功能进行合理分配以及如何保证系统稳定性等。针对以上问题,设计在宽带微功率 MAC 层一致性测试系统中引入真实的硬件模块,并通过其携带的时间戳寄存器解决测试系统的时间精度问题。测试系统总体框架设计如图 3 所示。

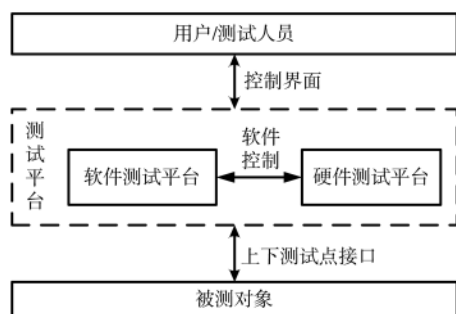


图3 宽带微功率 MAC 层一致性测试系统框架

测试系统中,用户/测试人员通过控制界面控制测试平台执行测试例,并实时查看测试信息。测试平台通过上下测试点接口和被测对象连接进行数据交互。测试平台由软、硬件测试平台两部分组成,其中软件测试平台包含 PC 端软件和硬件模块中的嵌入端软件,硬件测试平台包含整个测试系统中的硬件设备,由软件驱动。软件测试平台主要用于实现测试例的开发和管理、测试报告的生成和存储以及硬件设备的控制等,硬件测试平台负责执行具体的测试步骤,二者协作即可完成对宽带微功率 MAC 层的一致性测试。

3.1 硬件设计

硬件测试平台要能够执行具体的测试步骤,实现对被测对象的一致性测试,根据测试系统框架设计,最终搭建的硬件测试平台架构如图4所示。

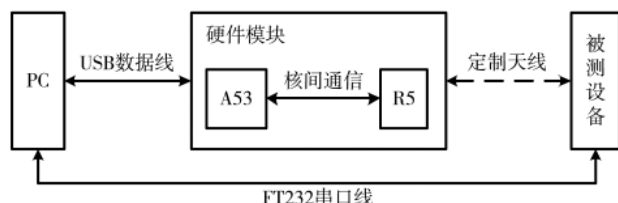


图4 硬件测试平台架构

硬件测试平台中,PC与硬件模块之间通过USB数据线连接,是网口通信,硬件模块由A53和R5两个处理单元组成,这二者之间通过核间通信完成数据交互。PC、A53和R5三者相互协作,控制测试例执行,共同组成了一个完整的测试平台。

另外,由于本文中的一致性测试系统采用的是本地测试法,因此测试平台具有上下测试点,其中上测试点位于PC端,主要模拟集中器和电能表与被测设备进行交互,其接口为PC与被测设备之间的串口,通过FT232串口线连接;下测试点位于硬件模块中,主要模拟CCO、PCO或STA与被测设备进行交互,下测试点与被测对象之间通过天线进行通信。

3.2 软件设计

3.2.1 PC 端软件架构

PC端软件首先要为用户提供简单易操作的控制界

面,其次要便于测试开发人员对测试用例进行开发、管理以及维护,最后要能够和测试系统中其他部分稳定通信,基于以上考虑,最终设计的PC端软件架构主要包括三部分,具体如图5所示。

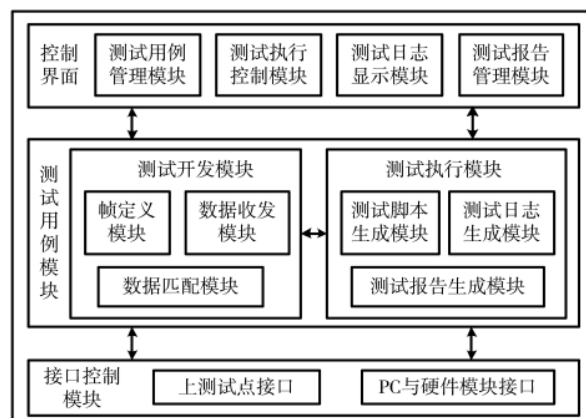


图5 PC 端软件架构

控制界面为一个可视化的图形界面,包括测试用例管理模块、测试执行控制模块、测试日志显示模块和测试报告管理模块。通过这4个模块,用户可以在控制界面选取测试用例控制其执行,并通过可视化窗口实时观察测试执行信息,在测试用例执行完毕后也能通过控制界面查看测试报告,分析测试结果。

测试用例模块主要用于测试用例的开发和执行,包括测试开发模块和测试执行模块。其中,测试开发模块用于将抽象的测试集生成具体的测试例,而测试执行模块负责执行测试脚本并记录执行信息,在执行结束后生成对应的测试报告。

接口控制模块主要负责的是相关接口的配置及通信,根据硬件测试平台架构可知,PC端有两个主要的接口:一是PC端与被测设备之间通信的串口,二是PC与硬件模块之间通信的网口。接口控制模块的作用就是保证这两个接口能够正常稳定地通信。

3.2.2 嵌入端软件架构

硬件模块选用的是成都定为电子有限公司定制的FPGA开发板,此款开发板使用Xilinx的ZYNQ Ultra-Scale+MPSoc XCZU6CG作为基带处理芯片,其中包含A53和R5两个处理单元。A53中运行Linux操作系统,R5中运行μC/OS-II实时操作系统,通过这两个部分的协作处理,可实现测试平台的相关功能。嵌入端的软件架构如图6所示。

嵌入端软件架构中,A53主要负责与PC端进行通信,在接收到测试例执行信息后,A53就会执行相应的测试步骤,构造发送报文,并对R5传送过来的响应报文进行一致性评判。因此,A53中包含了PC通信模块、测试执行模块以及测试结果判决模块。

R5主要负责和被测对象通信,故R5中含有一个射

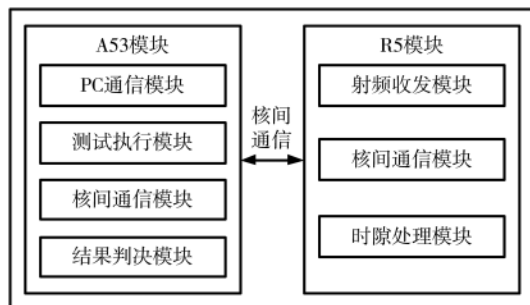


图6 嵌入端软件架构

频收发模块。R5中还包含一个时隙处理模块,用于对时隙进行处理和判断。例如模拟STA时,该模块会进行时间同步,并计算信标时隙和CSMA时隙的结束时间,为后续报文收发和时隙判断做准备。同步时间和时隙结束时间的计算过程如下:

同步时间计算公式为:

$$NTB_sync = BTS + (STA_NTB - RT_NTB) \quad (1)$$

式中,BTS为CCO发出信标的时间,STA_NTB为站点开始进行时间同步时的时间,RT_NTB为站点接收到中央信标时记录的时间。

信标时隙结束时间计算公式为:

$$BEACON_out = BPST + BTSL \times (NON_SLOT_NUM + 1) \times NTB_MS \quad (2)$$

式中,BPST为信标周期起始时间,BTSL为信标时隙长度,单位为1ms;NON_SLOT_NUM为非中央信标时隙总数;NTB_MS表示1ms的时钟计数值25000。

CSMA时隙结束时间计算公式为:

$$CSMA_out = BEACON_out + CSMATSL \times NTB_10MS \quad (3)$$

式中,CSMATSL为CSMA时隙长度,单位为10ms;NTB_10MS表示10ms的时钟计数值25000。

另外,A53和R5中都包含了一个核间通信模块,其主要是利用核间中断(Inter-Processor Interrupts, IPI)实现的。当一方要传输数据时,就会触发中断,而另一方等待到中断后即可执行相应操作读取数据。

4 测试系统验证

为验证本文所设计的测试系统能完成宽带微功率MAC层的一致性测试,搭建一致性测试环境,从功能和非功能两个角度分别对系统进行验证。

4.1 功能验证

4.1.1 测试系统通信自测

本文中所设计的一致性测试平台包含PC和硬件模块两部分,故测试系统通信自测主要验证PC与硬件模块之间的通信和硬件模块中A53与R5的通信。

图7为PC与硬件模块通信验证过程示意图。由图中标识1~3可知,在PC端可以成功登录到A53所在的Linux系统,并实现文件的正确拷贝,说明PC端和硬件模块之间能够正常通信。

图8为A53与R5通信验证过程的log信息图,左右分别为R5和A53打印的log信息。由图可知,A53发出的报文被R5正确接收,说明A53与R5之间能够成功通信,实现数据的正确收发。

4.1.2 测试例执行验证

为进一步证明测试系统能够支持测试例的执行。在测试系统中执行测试例“STA周期发送发现信标”,最终所得控制界面如图9所示,由图可知测试执行信息均正确显示,证明测试系统可正确执行测试例。

4.2 性能验证

4.2.1 时间精度验证

由于测试系统需具有较高的时间精度才能完成MAC层时隙相关内容的测试,故编写测试例进行验证。使测试系统周期发送一条测试帧,每次发送测试帧时,将定为开发板上GPIO接口的电平拉高,并接通示波器观察其波形。获取波形图中两高电平之间的间隔时间,与预设间隔时间取差值即可得出系统的时间误差,时间误差计算公式如下:

$$TimeDiff = |Et - Rt| \quad (4)$$

其中,TimeDiff为时间误差,Et为预设间隔时间,Rt为实际间隔时间。

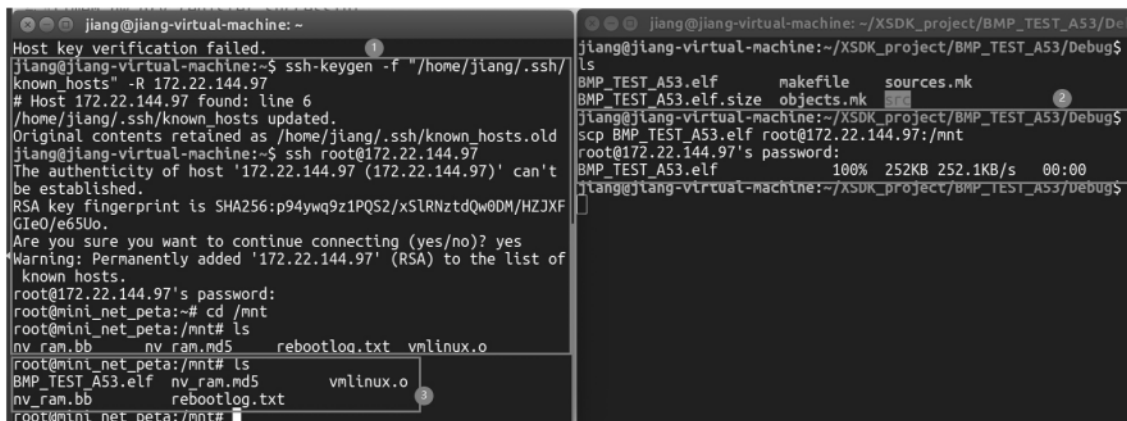


图7 PC与硬件模块通信验证过程示意图

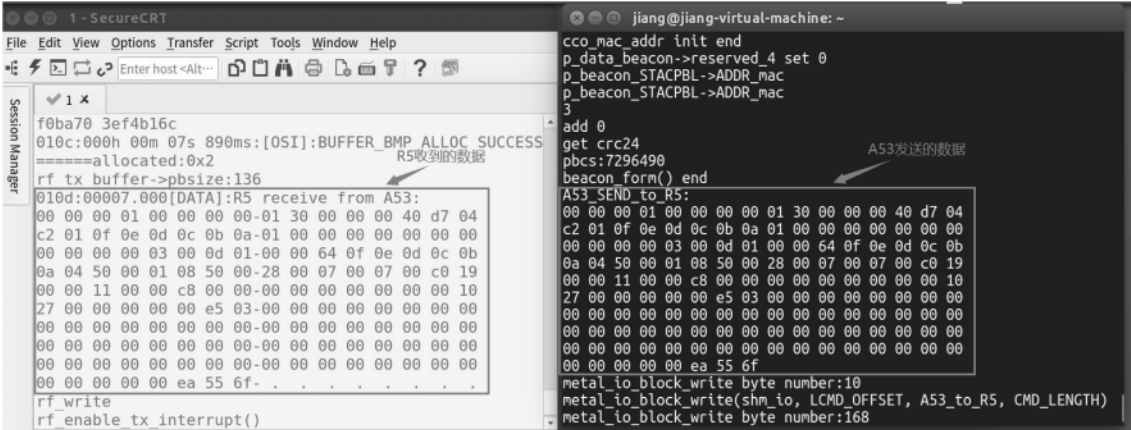


图 8 log 信息图



图 9 控制界面测试结果显示图

从波形图中随机抽取 100 组数据,计算时间误差分布情况如图 10 所示,图中横坐标为计数值,表示采集数据的次数,纵坐标为时间误差。由图可知,测试系统的时间误差都在 15 μ s 左右,波动较小,而宽带微功率协议中时隙数值的单位都为毫秒,故该测试系统能够满足 MAC 层时隙测试的要求。

4.2.2 稳定性验证

为保证执行大量测试用例时,测试系统能正常工作,对测试系统的稳定性进行验证。针对 CCO、PCO、STA 3 种被测对象分别选取一个测试例,构造信道质量正常、天线距离较远、衰减较大这 3 种环境,分别执行测试例 500 次,所得测试执行通过率如表 1 所示。

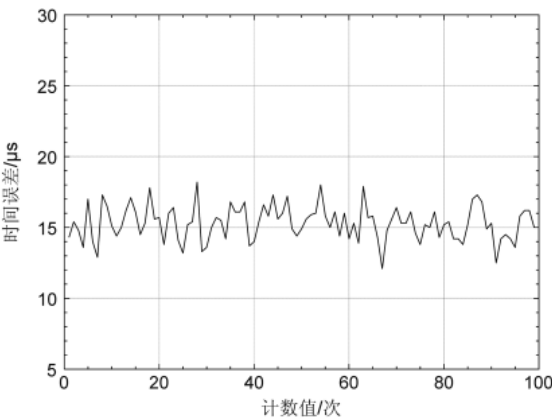


图 10 时间误差分布图

表 1 测试用例通过率

测试环境	CCO 通过率	PCO 通过率	STA 通过率 (%)
信道质量正常	100	100	100
天线距离较远	93.6	92.2	94.6
衰减较大	90.4	92.6	93.8

由表 1 可知,在信道质量正常情况下,测试用例通过率能够达到 100%,在另外两种信道质量较差的情况下,测试通过率相对降低,但均在 90%以上,基本满足要求,说明测试系统稳定性达标。

5 结论

本文针对宽带微功率 MAC 层一致性测试进行研究,设计了一种软硬件测试平台相结合的一致性测试系统。相较于当前的宽带微功率一致性测试系统,该系统具有较高的时间精度,可实现 MAC 层时隙功能的精准测试。通过测试验证,证明该系统已实现所有功能和性能要求,可完成对宽带微功率 MAC 层的一致性测试,保证了 MAC 层通信的准确性,提高了产品的可靠性,为宽带微功率技术的发展奠定了基础。

参考文献

- [1] 马艺玮,刘明杰,朴昌浩,等.智能电网信息工程的专业课程群教学模式改革研究[J].科技与创新,2022(3):136-138.
- [2] COLAK I, BAYINDIR R, SAGIROGLU S. The effects of the smart grid system on the national grids[C]//2020 8th International Conference on Smart Grid. IEEE, 2020.
- [3] DUAN J, ZHAO B, GUO S. The design and implementation of smart grid SOC platform[C]//2020 IEEE International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence(ICIBA). IEEE, 2020.
- [4] 刘晨,白泰,王家驹,等.用户用电信息采集系统的深化应用研究综述[J].电测与仪表,2022,59(2):1-8.
- [5] 韩娜,王婷,陈禹萌.低压用电信息采集系统的本地通信成功率分析[J].机电信息,2019(26):20-21.
- [6] 胡致远,宋洋洋,袁研根,等.微功率无线通信技术在电力线路中的适应性分析[J].电力系统自动化,2014,38(8):113-118.

(上接第 47 页)

- [14] KOO J, KIM B, SENIOR M. A quadrature RC oscillator with noise reduction by voltage swing control [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers, 2019, 66(8):3077-3088.
- [15] SAVANTH A, MYERS J, WEDDELL A, et al. A 0.68 nW/kHz supply-independent relaxation oscillator with $\pm 0.49\%$ /V and 96 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ stability [C]//IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. Dig. Tech. Papers, 2017:96-97.
- [16] LEE J, GEORGE A, JE M. A 1.4 V 10.5 MHz swing-

- [7] WU J, LI Y, CHENG H. Research on wireless communication quality analysis method in electricity information collection[C]//2020 IEEE International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence(ICIBA). IEEE, 2020.
 - [8] 钟晓欢.基于文本类型的应用层协议逆向解析技术的研究[D].北京:北京邮电大学,2014.
 - [9] 唐新竹,杨鹏飞,刘伟,等.电力微功率无线通信协议一致性测试系统设计与实现[J].电力信息与通信技术,2017,15(1):36-39.
 - [10] ZHANG H, LIU X, ZHENG K. Design of broadband PLC conformance testing system based on TTCN-3[C]//2018 International Conference on Information Systems and Computer Aided Education(ICISCAE). IEEE, 2018.
 - [11] 马畅.电力线通信协议测试系统设计[D].西安:西安电子科技大学,2018.
 - [12] WANG S, LI W. Technical research and platform implementation of the protocol conformance test of AFDX network switch[C]//2018 International Conference on Networking and Network Applications(NaNA). IEEE, 2018.
 - [13] 马润,王圣杰,华荣锦,等.电力物联网边缘物联代理的一致性测试系统研究[J].电力信息与通信技术,2021,19(10):58-64.
 - [14] ISO/IEC 9646-2:IT-OSI-Conformance testing methodology and framework:Part 2:Abstract test suite specification[S]. 1996.
 - [15] 谭喜堂,王东响,朱琴跃,等.HDLC 协议一致性测试系统的研究[J].计算机测量与控制,2014,22(1):63-65.
- (收稿日期:2022-04-06)

作者简介:

江蓓(1997-),通信作者,女,硕士研究生,主要研究方向:协议一致性测试、性能测试,E-mail:1352301837@qq.com。

岳桂君(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:互操作性测试、多网络测试。

周欣(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向:协议一致性测试。



扫码下载电子文档

boosted differential relaxation oscillator with 162.1 dBc/Hz FOM and 9.86 psrms period jitter in 0.18 μm CMOS [C]//IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. (ISSCC) Dig. Tech. Papers, 2016:106-108.

(收稿日期:2022-02-22)

作者简介:

尚林林(1983-),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向:模拟集成电路设计。

周盼(1993-),通信作者,男,硕士研究生,工程师,主要研究方向:模拟电源设计,E-mail:zhoupan@ssmec.com。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所