



支持无线个域网协议远程互操作性测试的测试客户端

张欣宇, 黄小红, 张 沛

(北京邮电大学网络技术研究院 北京 100876)

摘 要:为解决无线个域网协议互操作性测试中距离限制的问题,通过转发设备的引入,借助互联网资源的辅助,提出远程互操作性测试平台的概念。针对无线个域网协议的特点设计平台客户端的总体结构,并根据具体的协议测试场景细化设计方案。通过典型的低速无线个域网协议 6LoWPAN 协议标准的测试实验结果来评估平台客户端的可用性。

关键词: 远程测试; 协议测试; 无线个域网; 6LoWPAN

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015285

Remote Interoperability Testing Client for Wireless Personal Area Network Protocol

Zhang Xinyu, Huang Xiaohong, Zhang Pei

(Institute of Network Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: When the entities in one interoperability testing case were not suitable to be placed in the same physical location, the remote testing method was needed to complete the testing. In order to guarantee the success of the remote testing, a platform based on the Internet environment was built. A system structure was designed for assure the platform was suitable for wireless personal area network protocol. The framework mainly contained the device connection module and the data forwarding module. To illustrate the application of proposed approach, a real case study was proposed: the 6LoWPANs protocol. The results of the experimentation performed on this protocol were also presented.

Key words: remote testing, protocol testing, WPAN, 6LoWPAN

1 引言

协议测试技术是保证网络通信协议正确实现的重要手段。其中,一致性测试是基本的协议测试方法,其目标是

检测协议实现是否与协议规范相一致;作为一致性测试的补充,互操作性测试的主要目标是测试两个或更多的协议实现是否能进行正确的交互,从而完成协议标准中所规定的功能^[1];远程测试的提出则解决了协议测试中存在的物

收稿日期:2015-06-26;修回日期:2015-10-26

基金项目:国家国际科技合作与交流专项项目(No.2013DFE13130),国家科技支撑计划基金资助项目(No.2015BAH04F02),“北京市支持中央高校共建项目——青年英才计划”项目专项资助课题

Foundation Items: National International Scientific and Technological Cooperation Program and Exchange Program(No.2013DFE13130), National Key Technology Support Program(No.2015BAH04F02), “The Central University Co-Construction Program of Beijing-Youth Talent Plan” Special Funded Program

论文引用格式:张欣宇,黄小红,张沛. 支持无线个域网协议远程互操作性测试的测试客户端. 电信科学,2015285

Zhang X Y, Huang X H, Zhang P. Remote interoperability testing client for wireless personal area network protocol. Telecommunications Science, 2015285

理距离限制的问题。目前的远程测试的研究内容集中在一致性测试方面,实现了测试操作人员与被测设备之间物理位置的分离,避免测试人员置身于被测设备所在的恶劣的物理环境之中^[2];但这并不能达到远程互操作性协议测试中分离两个被测设备物理位置的目的。因此,提出构建一套远程互操作性协议测试平台来摆脱被测设备之间物理距离的限制,辅助完成这种有传输距离限制的协议的互操作性测试。本文提出了无线个域网远程测试平台结构,并针对平台中的客户端进行了深入的研究。

2 无线个域网远程测试平台

2.1 无线个域网

无线个域网 (wireless personal area network, WPAN) 是由部署在检测区域内的大量微型传感节点组成,各节点之间通过无线通信的方式进行数据传输。其主要作用是通过节点感知、测量并收集其所处环境的信息,如温度、湿度等,并将数据在一定的决策分析之后呈现给用户^[3]。

考虑其实际使用范围以及成本,WPAN 的节点通常只配置了少量的硬件资源。其无线传输范围也受限于其低功率的特性。所以,如果两个期望接受测试的 WPAN 设备无法布置在相同的物理位置,就无法直接通过无线进行组网。

可以看出,远程测试适用于 WPAN 协议互操作性测试的场景。

WPAN 定义了两种设备类型,它们是全功能设备 (full function device, FFD) 和精简功能设备 (reduced function device, RFD)。其中, RFD 仅可以与 FFD 进行通信,两个 RFD 之间无法直接通信,而 FFD 则可以与两种类型的节点直接通信。

WPAN 组网中的节点又按照其负责的功能,划分为两种角色类型:普通节点和网络协调器 (coordinator)。其中,网络协调器相当于传统局域网中的路由器,负责所在网络的管理工作。每个 WPAN 中必存在一个网络协调器,并且该角色只能由 FFD 担当。普通节点既可以是 FFD,也可以是 RFD。

WPAN 有星型、网型、簇型 3 种组网模式。图 1 所示的星型组网为 WPAN 最基本的组网模式,被广泛应用在实际生产中。星型组网的工作方式为:普通节点通过网络协调器对所收集的数据信息进行汇总,并由网络协调器呈现给用户。以其为例讨论 WPAN 的远程互操作性测试结构。

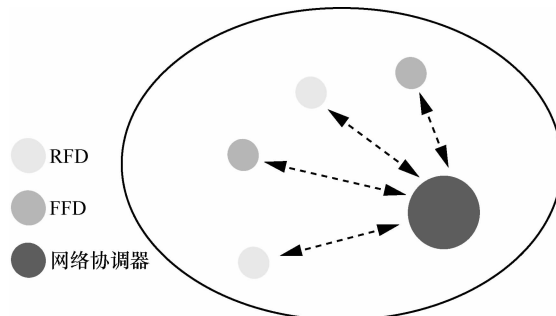


图 1 无线个域网拓扑

2.2 无线个域网远程测试平台

WPAN 的各个设备分别置于不同的物理位置时,则无法通过无线信号直接完成组网,需要在被测设备可达的无线环境中布置测试工具来收集其无线信号,并通过互联网发送给对端被测设备,实现间接的组网。

WPAN 协议的远程互操作性测试网络的拓扑如图 2 所示。其中, TD (testing device) 表示测试人员需要布置的测试节点。如果期望对节点 1 与节点 4 之间的互操作性进行测试,则需要先将数据发送给测试设备 2,并通过互联网将这些数据转发给对端所布置的测试设备 3,最终由节点 4 接收。

为达到 WPAN 远程测试的目的,将整个测试平台划分为客户端与服务器两部分。

服务器布置于互联网之中,负责所有客户端之间连接的维护,并对各个客户端发送的数据进行汇总与管理。

客户端充当了图 2 所示的 TD 的角色,测试平台中所有被测协议设备的接入都是由客户端负责,所有的协议相关内容均由客户端进行处理,使被测协议细节对服务器透明化,保证平台的通用性。

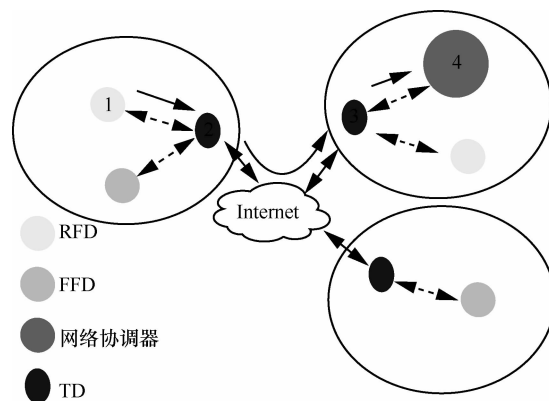


图 2 无线个域网远程互操作性测试网络拓扑



3 客户端总体设计

3.1 客户端设计原则

客户端采取模块化的设计方式,模块设计中主要遵循如下原则。

- 按照功能职责划分模块,每个模块仅负责一种消息的处理或者一种连接的建立以及维护,方便后续工作中做出功能上的拓展,使客户端保持良好的前向兼容性与后向拓展性。
- 模块间通过传递二进制消息来实现协作,达到测试目的。模块无需关心接收到的消息如何产生,仅需根据消息内容做出相应的处理。该原则隔离了模块间细节的相互依赖,达到了模块内的高内聚、模块间的松耦合。

3.2 客户端总体结构

图3展示了协议互操作性测试平台客户端的总体结构,客户端与服务器通过互联网传输数据。客户端按照功能主要划分为两个模块:IMM (information management module,信息管理模块)主要负责用户与设备信息的管理工作,其中包括用户/设备的注册、用户登录、相关协议测试设备信息的获取,为了保证测试数据链路畅通,将客户端与服务器之间交互的通路分成了3条,其中,通路1仅负责设备以及用户信息的提交与下载;TMM (testing management module,测试管理模块)主要负责测试过程的控制与管理,包括测试连接的建立与维护、测试过程的开启与结束以及将由通路4获得的对端测试设备信息呈现,其中,子功能模块DCM(device connection module,设备连接模块)、SCM(server connection module,服务器连接模块)则分别负责与被测实体、服务器的连接工作。通路2主要负责

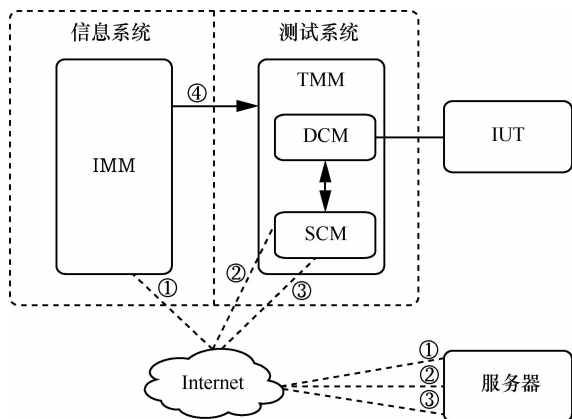


图3 客户端的总体结构

测试数据的传输,通路3则负责测试控制信息的传输。

用户将所需测试的设备连接到平台客户端,并选择希望进行互操作性测试的对端设备建立通信链路,就可以实现测试目的。

3.3 需要考虑的问题

在实现远程互操作性测试平台客户端的过程中,会面临如下几个问题。

(1)设备连接

现存的通信协议种类繁多,所以期望测试平台保证对WPAN协议可测试的同时,对其他协议的加入也有良好的扩展性。本文中考虑将测试过程中需要与被测设备交互的几种方式抽象成接口,将与被测实体连接的DCM做成插件的形式根据被测协议的不同而分别加载,这样就同时保证了平台的通用性和可用性,并可以通过添加新插件的方式来实现平台的前向拓展。

(2)报文获取

对WPAN协议的测试主要是通过对该协议所对应的报文首部各字段进行分析的方式完成的,为了保证被测协议报文信息的完整性,信息采集时应使用被测协议层级之下的协议栈与被测设备进行通信。

(3)客户端角色确认

由于被测设备的角色可能为普通节点,也可能为网络协调器,所以当测试设备进入网络时,需要感知当前的网络环境来确定自己的角色。为保证和被测设备之间能够直接通信,客户端应该借助FFD实现与被测设备之间的连接。

4 设备连接模块接口

在保证平台客户端可用性和扩展性的前提下,模块应支持的接口如图4所示。

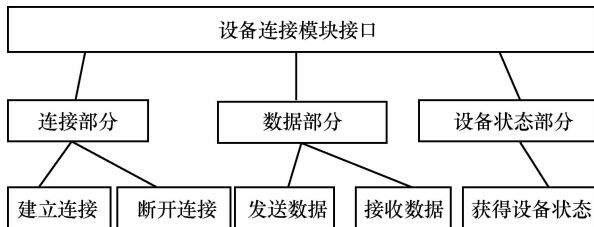


图4 设备连接模块接口分类

首先,协议测试的过程中被测实体的行为是基于它主动或被动交付到网络环境中进行分析的。因此,测试平台达到协议互操作性测试目的的必要前提是设备连接模块可以与被测实体之间进行数据的接收与发送。

其次,为减小远程测试与本地测试数据交互过程的差异性,平台建立并维护长连接来减小网络环境抖动所造成的干扰。在测试活动开始与结束的边界,设备连接模块应分别借助建立连接与断开连接接口来维护互操作性测试被测实体间的这条长连接。

最后,考虑到在测试开启之前以及测试过程中,需要向客户端如实反映被测设备的连接状态以排除意外因素对测试工作的影响,保证测试结果的正确有效。客户端需要通过连接模块获得被测设备的实时连接状态。

5 6LoWPAN 协议报文获取

5.1 6LoWPAN 协议标准

6LoWPAN 是一种基于 IPv6 的低速无线个域网标准,即 IPv6 over IEEE 802.15.4。其设计目的为将 IPv6 协议拓展到低速率无线个域网(LR-WPAN)上,是一种典型的无线个域网协议^[4]。

6LoWPAN 的协议栈如图 5 所示,其底层为 IEEE 802.15.4 标准,与一般个人计算机网卡所支持的 IEEE 802.11b 标准不可以互联互通,所以无法从计算机本身的网卡处获取该网络上传输的数据。为达到该协议的测试目的,考虑让设备连接模块借助辅助设备从无线个域网络中获取数据,并通过与计算机相连接的串口将数据发送给计算机。这种辅助设备称为数据转发模块。

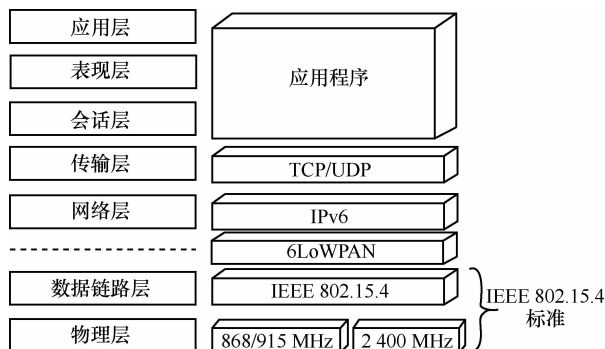


图 5 6LoWPAN 协议栈与 OSI 模型对比

5.2 6LoWPAN 协议测试的必要性及可行性分析

5.2.1 6LoWPAN 协议测试的必要性

无线个域网络设备低功率的特性限制了 6LoWPAN 协议标准实现设备的传输距离,其中具有代表性的 ZigBee 节点所支持的信号有效传输距离仅介于 10~100 m,且距离上限仅在无遮挡的室外环境中可以保证,局限性很大。所以如果希望测试的设备并不在相同的物理位置时,难以通过无

线信号完成直连。所以,6LoWPAN 协议的互操作性测试受到距离的限制,适合于本测试平台的使用场景。

5.2.2 6LoWPAN 协议测试的可行性

IEEE 802.15.4 将其物理层分成了 26 个信道,其中 11~26 号信道的中心频率为 $2405+5\times(\text{信道号}-11)$;可行性实验中,被测的 Contiki 节点通过 26 号信道完成节点间的数据收发。

可以使用转发模块辅助地实现计算机与 6LoWPAN 被测设备的通信。通过在德州仪器公司的 CC2530 开发板上用 BasicRF 这种简单的无线射频收发函数来采集环境中 26 号信道的信号,并打印到计算机串口。经过一段时间的数据采集,串口调试助手手中打印出了被测节点广播的路由请求报文,证明了 6LoWPAN 协议测试的可行性。

5.3 数据转发模块

数据转发模块由无线交互模块、串口交互模块以及中心控制模块 3 部分组成。

5.3.1 无线交互模块

无线交互模块是转发模块中直接与被测设备进行数据交换的部分。6LoWPAN 协议规范^[5]中定义,6LoWPAN 对 IPv6 报文的分片与压缩工作集中在网络层与数据链路层之间(通常称为适配层),如图 5 所示。测试过程中,需要通过直接调用底层 IEEE 802.15.4 MAC 的协议实现完成数据的收发工作,保证被测协议报文完整地存在于测试数据之中。交互流程设计如下。

在数据发送过程中,无线数据模块会调用 MAC 层的数据发送接口将数据发往被测设备,如果被测设备做出预期的响应,MAC 层会触发状态信息为 MAC_success 的 MAC_MCPS_DATA_CNF 回调事件。如果被测设备没有做出预期的响应,MAC 层则会触发状态信息为 MAC_NO_ACK 的 MAC_MCPS_DATA_CNF 回调事件,宣布本次数据发送失败。无线交互模块会根据失败的回调状态进行数据重发,如图 6 所示。

如果一次发送与对应的 3 次重发均宣告失败,则将失败信息反馈给客户端。

无线交互模块会同时监听 MAC 层给出的无线数据接收回调事件 MAC_MCPS_DATA_IND。如果该事件触发,则将数据存入缓存区,再交给中心控制模块做出相应处理。

5.3.2 串口交互模块

串口数据模块通过数据转发模块与计算机连接的串口来完成与客户端之间的数据交换。由于 RS-232 串口协

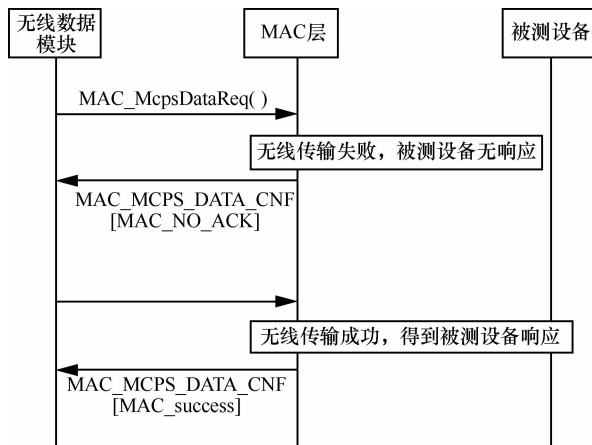


图6 无线数据模块进行重发的过程

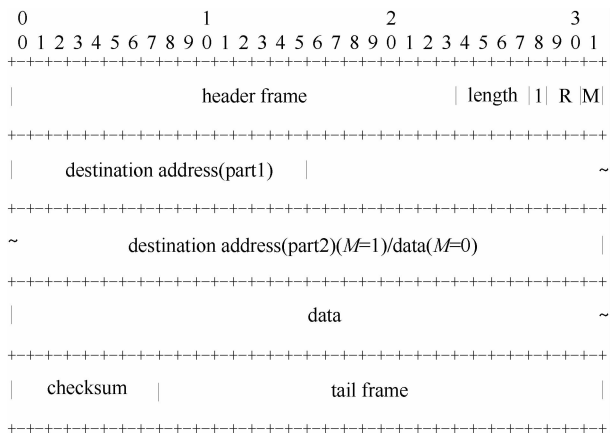


图8 数据帧结构

议不足以保证收发数据的完整性,所以要设计独立的串口帧格式来减少错误的传输对测试结果的影响。

串口帧设计:

传输帧主要分为控制帧和数据帧两种,通过标记位进行区分。

标记位为0表示这个帧为控制帧,如图7所示。首尾帧作用是将有效数据与无效数据相隔离。要注意的是,较长的报文通过计算机串口发送到转发设备上的时候,由于时延原因可能提前触发串口收发中断,所以从串口上读取到的数据并不一定是一个完整的数据报文,应该在数据通过串口之前加入长度的标记,以对报文的完整性进行校验,0是控制帧的标记。后3位在控制帧内尚未使用,留作拓展用。控制帧所负责的功能主要是重新配置转发设备的通信隧道与PAN_ID,如所对应的位置值为0,则表示无需重新配置;非0,则为新的对应字段。checksum为校验和。

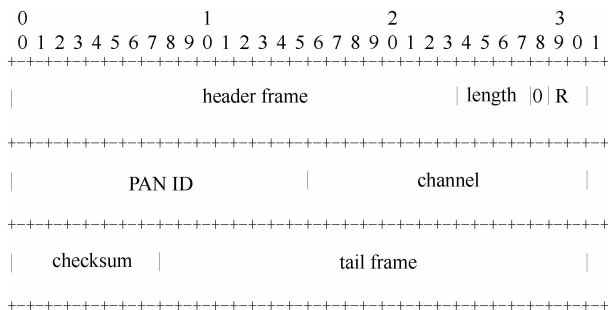


图7 控制帧结构

标记位为1表示这个帧为数据帧,如图8所示。首尾帧、长度字段、校验和的作用与控制帧相同。 M 字段表示本数据分组对应的被测设备地址的模式, $M=0$ 表示16 bit短

地址, $M=1$ 表示64 bit的长地址,对应了随后地址字段应被解析的实际长度;数据字段内则为实际应发送给被测设备的报文内容,包含6LoWPAN压缩报文在内以及协议栈上层的各层数据。

当从串口上获得了数据后,会拆除首尾部的封装帧,然后将数据转发给中心控制模块。

5.3.3 中心控制模块

中心控制模块是整个转发模块功能的核心,其主要工作如下。

- 处理无线数据模块和串口数据模块的收发数据。串口数据模块所提供的数据,如果解析为一个控制帧,那么将读取其中的配置信息对转发模块进行新的参数配置,并重启模块使参数生效。而解析到一个数据帧的时候,会将其中的地址信息以及数据信息分别读取并暂存,然后将两部分数据全部推送到无线交互模块发送给被测设备。从无线交互模块接收到的数据则通过串口推送给计算机。
- 向客户端提供被测设备的连接状态信息。当期望获得被测设备的实时连接状态时,客户端首先通过获取连接状态的方法向所对应的串口发送一个标记位为2、数据域为期望得到状态的设备地址的帧,当中心控制模块接收到这样的帧时,会向被测设备发送一个期望得到ACK的空白帧(空白帧指帧的数据段为空)。如果所接收到的回调事件为MAC_MCPS_DATA_CNF且status为MAC_success,那么设备仍然在连接状态下;如果status为MAC_NO_ACK,那么设备连接状况不佳,应中断协议的测试进程。这样的帧在被测设备MAC层做出

ACK 响应之后,将被上层协议所丢弃,不会对协议测试活动本身造成影响。

6 客户端角色的确立

客户端与被测设备的组网实际是通过转发模块来完成的,因此转发模块在无线个域网中的角色是客户端的角色。无线转发模块加入网络时,角色确立的过程由中心控制模块完成。

测试设备启动时,中心控制模块会在所处的网络中广播网络同步请求。IEEE 802.15.4 标准^[7]中定义,如无线个域网网络中存在协调器,会响应这样的同步请求,告知其他设备其存在,触发转发模块 MAC 层的 MAC_MLME_SCAN_CNF 回调事件。中心控制模块根据回调事件向网络协调器请求网络信息,进而根据它所提供的个域网标识以及频段信息(通过 MAC_MLME_associate 回调事件携带给中心控制模块)来做出同步动作,以普通节点的方式启动,如图 9 所示。如果未得到网络中存在协调器的响应,那么中心控制模块则会将自己以协调器的方式启动,并允许其他被测设备加入它所管理的无线个域网内。

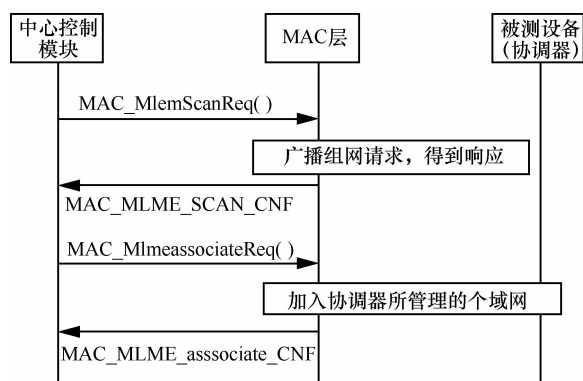


图 9 中心控制模块确定测试设备角色过程

考虑到实际被测设备的 MAC 层实现存在不支持上述自动角色确立过程的可能,客户端也可以通过发送第 5.2.2 节中所描述的控制帧的方式配置与被测设备相同的个域网标识与频段,手动完成组网工作。

7 客户端可行性验证

7.1 实验环境搭建

本实验的硬件要求为:3 台计算机和两块无线个域网开发板。

服务器需部署在一台拥有固定公网 IP 地址的计算机上。这台计算机需安装 Windows 7 操作系统,并在系统上

安装 TTworkbench 自动化测试平台来完成对整个测试过程的管理工作。TTworkbench 的适配器配置为对本机 10000、10001 号 TCP 服务端口进行监听,以完成与客户端数据连接的建立。

客户端所部署的计算机应要求有一个 USB 端口来连接数据转发模块,并可以接入互联网。两块开发板所实现的转发模块分别连接在两台计算机的 USB 接口上,计算机安装 USB 转串口驱动模拟成串口完成数据操作。客户端的服务器连接模块与服务器的对应端口建立 TCP 连接,设备连接模块波特率设置为 115 200,数据位 8 与无线传输模块所连接的模拟串口进行连接。

数据转发模块为使用 OSAL (operating system abstraction layer,操作系统抽象层)接口所实现的符合事件监听模型的小型系统。通过系统消息来完成 3 个子模块之间数据的传递。搭载模块的平台为德州仪器公司的 CC2530 片上解决方案。

7.2 实验流程设计

在 6LoWPAN 协议互操作性测试的过程中,一个测试单元可以按照如下 4 个基本步骤完成。

步骤 1 建立服务器与两个测试客户端之间的 TCP 连接。

步骤 2 向被测设备施加激励行为,开启互操作性测试过程。

步骤 3 服务器记录被测设备间收发的测试数据。

步骤 4 断开连接,结束测试,并通过测试数据分析被测设备状态与行为,确定实验结果。

7.3 实验结果

图 10 为 6LoWPAN 协议测试中 6LoWPAN_IPHC (internet protocol header compression, 互联网协议头压缩)的单播状态性压缩测试例的测试过程的记录。可以看出,测试数据通过服务器的转发,在两个测试节点之间可以进行正确的收发。通过本文中所设计的客户端结构,完成无线个域网协议的互操作性测试具有可行性。

8 结束语

在尽量保证平台通用的前提下,阐述了平台中客户端的总体设计思路,并针对 6LoWPAN 协议标准的测试讨论了客户端的一些设计细节,并搭建了一套测试环境,验证了测试方法的可行性。测试平台的最终实现效果为,用户只需要通过客户端在平台上进行协议实现设备的注册,并进行简

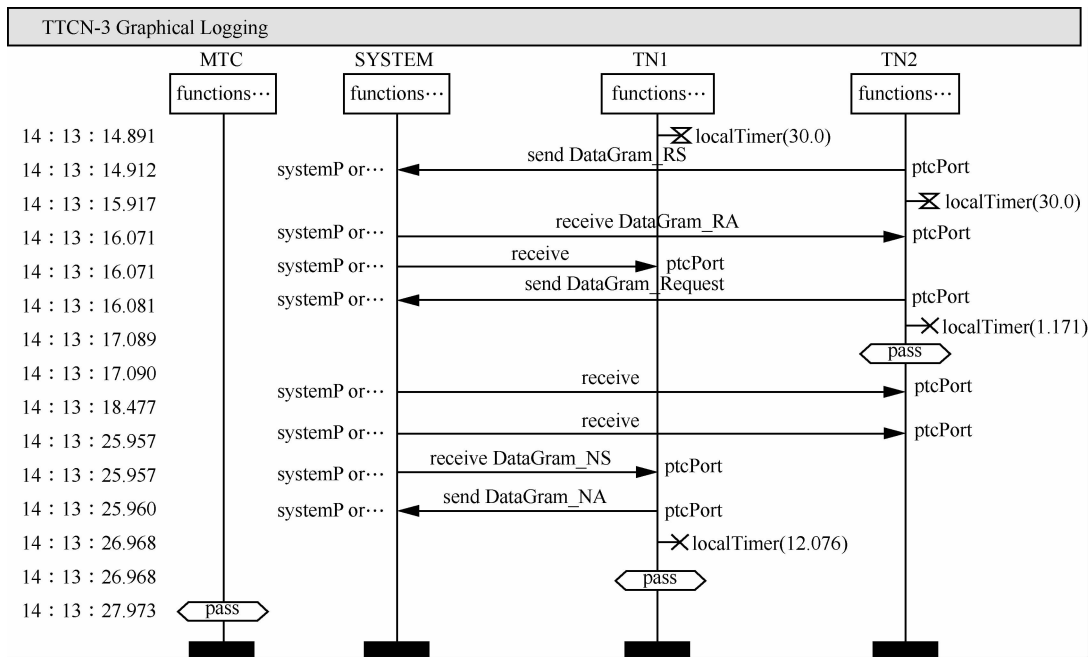


图 10 服务器上 TTworkbench 记录的 6LoWPAN 协议测试的图形化日志

单的预约操作,就可以达到远程进行互操作性测试的目的。

参考文献

- 王之梁, 吴建平, 尹霞. 基于通信多端口有限状态机的协议互操作性测试生成研究. 计算机学报, 2006, 29(11): 1909~1919
- Wang Z L, Wu J P, Yin X. Protocol interoperability test generation based on communicating multi-port FSMs. Chinese Journal of Computers, 2006, 29(11): 1909~1919
- Xie H, Wei L, Zhou J, *et al.* Research of conformance testing of low-rate wireless sensor networks based on remote test method. Proceedings of 2013 Fifth International Conference on Computational and Information Sciences (ICCIS), Shiyang, China, 2013: 1396~1400
- Sohrabi K, Gao J, Ailawadhi V, *et al.* Protocols for self-organization of a wireless sensor network. IEEE personal communications, 2000, 7(5): 16~27
- Kushalnagar N, Montenegro G, Schumacher C. Rfc 4919: Ipv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6lowpans): Overview. Assumptions, Problem Statement, and Goals, 2007
- Hui J, Thubert P. Compression Format for IPv6 Datagrams over IEEE 802.15. 4-Based Networks. IETF RFC6282, 2011
- Shelby Z, Chakrabarti S, Nordmark E, *et al.* Neighbor Discovery Optimization for IPv6 Over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs). RFC6775, 2012
- IEEE 802.15.4 Standard-2006. Wireless MAC and PHY Specification for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), 2006
- Texas Instruments. 802.15.4 MAC Application Programming

Interface, 2006

- Texas Instruments. HAL Drivers Application Programming Interface, 2006

[作者简介]



张欣宇,男,北京邮电大学硕士生,主要研究方向为下一代互联网关键技术。



黄小红,女,博士,北京邮电大学副教授,主要研究方向为下一代互联网关键技术。



张沛,男,博士,北京邮电大学讲师,主要研究方向为网络空间安全。