

# 6LoWPAN 适配层协议的一致性测试

虞航, 王能

(华东师范大学计算机科学技术系, 上海 200062)

**摘要:** 为 6LoWPAN 适配层协议设计和实现了一致性测试的测试用例和测试平台。在分析 6LoWPAN 适配层协议的基础上, 划分了测试组, 建立了测试目标, 根据测试目标设计了近 100 个测试用例。根据测试中激励发送和协议行为观测的需要, 设计并实现了测试平台。在该平台上, 成功运行了 90 多个测试用例, 对网络实验室的适配层实现进行了测试, 达到了一致性测试的目的。

**关键词:** 802.15.4 标准; 6LoWPAN 适配层; 一致性测试

## Conformance Test of 6LoWPAN Adaptation Layer Protocol

YU Hang, WANG Neng

(Department of Computer Science & Technology, East China Normal University, Shanghai 200062)

**【Abstract】** Test cases and test platform are designed for conformance testing of 6LoWPAN adaptation layer protocol. Based on analyses of 6LoWPAN adaptation layer protocol, test purposes are grouped and created. Nearly 100 test cases are designed for these test purposes. To conduct test cases, a test platform is developed to send stimuli and observe the behavior of the system under test. The conformability of the adaptation layer implementation is achieved by using more than 90 of these test cases.

**【Key words】** 802.15.4 standard; 6LoWPAN adaptation layer; conformance test

### 1 概述

将 IPv6 和无线传感网技术结合是目前国内外一个较为热门的研究方向。目前已有一些为无线传感网设计的 MAC 层协议, 其中 IEEE 802.15.4 是工业标准<sup>[1]</sup>。从 2004 年起 IETF 设立了 6LoWPAN 协议工作组专门对 IPv6 协议在 IEEE 802.15.4 上的实现进行研究<sup>[2]</sup>。然而, 与以太网、802.11 等传统链路层不同, 标准的 IPv6 协议不能直接构建在 IEEE 802.15.4 MAC 层之上。为此, 需要在 IPv6 网络层和 IEEE 802.15.4 MAC 层之间加入一个中间层, 即适配层, 将 IPv6 运行在无线传感器网络之上。

网络实验室依据 6LoWPAN 草案<sup>[3-4]</sup>, 在一系列相关研究后提出了一种适配层的实现方案, 并且基于 freescale 的 IEEE 802.15.4 MAC 层, 实现了适配层协议。为了验证适配层实现的正确性, 需要对其执行协议的一致性测试。本文介绍针对适配层的测试用例的设计和相应测试平台的实现。

### 2 适配层协议简介

适配层位于 802.15.4 MAC 层之上、IPv6 协议栈之下, 主要解决 IPv6 协议栈无法直接运行在 802.15.4 MAC 层之上的问题。适配层协议行为主要包括:

(1) 传感器节点的组网和拓扑维护。采用 802.15.4 的 beacon 模式组网, 并使用树状拓扑。适配层协议定义了 3 类节点: Pan Coordinator, Common Coordinator 和 End Device。Pan Coordinator 只能作为树根节点, Common Coordinator 作为中间节点和叶节点, 而 End Device 只能作为叶节点。组网后, 适配层就可以利用 802.15.4 提供的服务, 在父子节点之间传输数据。

(2) 适配层报文的发送、接收和转发。发送方将 IP 报文封装在适配层报文中, 接收方从适配层报文中提取 IP 报文,

Coordinator 根据树状路由算法转发适配层报文。

(3) 分片和重组。将一个较大的 IP 报文分片到多个适配层报文中, 并从多个适配层报文中重组 IP 报文。

(4) 适配层广播。将 IP 层组播转化为 802.15.4 广播和单播。

(5) 头部压缩和解压缩。对 IP 报头进行压缩和解压, 以减少 IP 头部开销。

802.15.4 MAC 层为适配层提供底层服务。适配层通过调用 802.15.4 MAC 层原语, 实现相应的功能。

### 3 测试模型

适配层的测试采用黑盒测试, 其模型基于 ISO/IEC 9646<sup>[5]</sup> 定义的分布式测试法, 如图 1 所示。

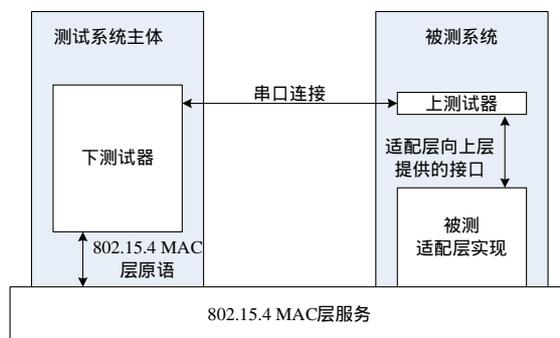


图 1 适配层测试模型

**基金项目:** 上海市科委重大科技攻关计划基金资助项目(05dz15004)

**作者简介:** 虞航(1983-), 男, 硕士研究生, 主研方向: 计算机网络; 王能, 教授、博士生导师

**收稿日期:** 2007-08-16 **E-mail:** micro-yu@163.com

在该模型中，测试系统的主体与适配层被测实现位于不同的物理实体中。802.15.4MAC 层是底层服务提供者。下测试器通过 802.15.4MAC 层原语使用底层服务，与被测系统交互，从而激励被测系统。上测试器也是测试系统的一部分，它实现在被测系统上。上测试器通过适配层向上层提供的接口与被测的适配层交互，从而对被测实现做某些控制。上测试器与测试系统主体通过串口连接。测试判决主要是通过观察无线信道上的 MAC 帧或下测试器收到的 MAC 层原语的内容做出的。

#### 4 测试目标的确立和测试例的筛选

按照测试用例设计的一般步骤，设计适配层测试用例时，首先需要对协议作充分分析，划分可以进行测试的基本协议规程，作为测试目标。测试用例按照这种划分编成测试组，测试组通常具有层次结构，一个大的测试组中可能包含了若干小的测试组。

根据适配层功能及相应协议行为，适配层测试内容划分成几大测试组。它们分别是：传感器节点的组网和拓扑维护，适配层报文的发送、接收和转发，适配层广播，分片和重组，头部压缩和解压缩。接着，又对这几大测试组分别作了进一步划分。例如，对于组网和拓扑维护测试组，按照节点在组网和拓扑维护中可能经历的过程，进一步划分为启动过程、加入网络过程、离开网络过程、孤儿扫描过程等几个测试组。每个测试组根据其相应的协议规范，都有其特定的测试目标。例如，在加入网络过程中，父节点是否能正确地运用地址分配算法为子节点分配 16 位 MAC 地址，是一个测试目标。

另外，适配层协议定义了 3 类节点：Pan Coordinator, Common Coordinator 和 End Device。这 3 类节点的区别主要在于它们在树状拓扑中所扮演的角色。因此，它们组网和拓扑维护的协议行为有很大差别。为此，在测试组的划分中，特别为这 3 类节点的组网和拓扑维护分别成立了测试组，编写各自的测试目标。适配层 3 类节点的不同角色还导致了他们在适配层报文的转发和适配层广播的协议行为上有所区别，因此在这 2 个测试组中，也对这 3 类节点的不同协议行为各自编写了测试目标。而对于分片、重组，头部压缩、解压缩的协议行为，这 3 类节点是一致的，因此在这 2 个测试组中，就不再为这 3 类节点分别编写测试目标了。

测试例的编写围绕测试目标展开。由于不可能作穷尽测试，因此需要对测试用例做出筛选。筛选的原则之一是要有代表性。在重组 IP 报文的测试中，针对不需要重组、从 2 个分片中重组、多个分片顺序到达、乱序到达、分片重复、分片超时等情况设计了测试用例。在树状路由算法的测试中，针对适配层报文目的地址字段的值是被测节点的子节点、孙子节点、父节点、被测节点本身，以及目的节点在树的另一个分支上和目的节点不可达等情况设计了测试用例。除了代表性之外，测试用例的选取还要考虑到某些特殊情况。在地址分配算法的测试中，特别针对地址分配殆尽和即将分配殆尽的情况设计了测试用例。

#### 5 激励的发送和协议行为的观测

适配层的测试采用黑盒测试。测试时向被测实现发送激励，促使其执行相应的协议行为，然后通过观察协议行为，判断协议实现是否正确。在适配层测试用例中，设计和使用了以下几种方法发送激励和观测协议行为。

##### (1)使用测试器

在测试中，需要模拟被测节点对等实体的协议行为，与

被测实现交互，从而达到激励被测实现的目的。这个功能由测试器完成。

在被测节点一方，被测适配层实现通过调用 802.15.4 MAC 层原语实现协议功能。在测试器一方，底层也有 802.15.4 的实现。测试系统手动调用相应的 802.15.4 MAC 层原语，激励被测节点。例如，测试父节点接收子节点加入的协议行为时，测试系统调用 MLME-ASSOCIATE.request 原语模拟子节点的加入行为，通过观察收到的 MLME-ASSOCIATE.confirm 原语中的内容来判断父节点是否成功地处理了子节点的加入请求并分配了适当的 16 位 MAC 短地址。

##### (2)使用 Sniffer

Sniffer 是 802.15.4 协议分析工具。它可以捕获 802.15.4 无线信道上的报文，并根据 802.15.4 的帧格式分析报文内容。

在很多测试用例中，协议行为的观测是通过 Sniffer 捕获被测节点发出的 802.15.4 MAC 帧实现的。例如，测试 Pan Coordinator 启动的过程时，通过观测 beacon 帧中所携带的 beacon payload 等信息判断 Pan Coordinator 是否正确启动；测试 IP 报文的分片时，通过观测数据帧里封装的内容判断分片是否正确。

##### (3)使用辅助节点

在某些测试用例中，被测节点需要与多个其他节点交互；在另一些测试用例中，以手动方式控制测试器不能达到激励被测实现的目的。这时需要一个或多个其他节点能自动或半自动地模拟适配层协议行为，与被测实现交互。这些功能由辅助节点完成。

对于适配层广播报文的转发，被测节点会以广播的方式转发给 Common Coordinator 类型的子节点(若存在)，以单播的方式发送给各个 End Device 类型的子节点(若存在)。为了测试适配层广播报文的转发，需要引入辅助节点作为被测节点的子节点加入网络。

对于 Common Coordinator 和 End Device 的很多测试，只有当被测节点加入网络后才可测。这就需要模拟父节点的行为，接收被测节点的加入。要接收子节点的加入，父节点必须在收到 MLME-ASSOCIATE.indication 原语后不到 1 s 的时间内调用 MLME-ASSOCIATE.response 原语给出响应。否则子节点一方会超时，导致加入失败。通过手动控制测试器的方法调用原语无法及时给出响应。因此在测试例中遇到类似情况时都会引入一个辅助节点，扮演父节点的角色，自动响应子节点的加入请求。

在上述测试中，辅助节点通常被用来引导被测节点进入待测状态。有时，还需要辅助节点直接向被测节点发送激励。在测试子节点离网的协议行为时，需要父节点向子节点发送离网命令，触发子节点动作。测试时，辅助节点首先作为被测节点的父节点，接收被测节点的加入。这些动作由辅助节点自动完成。然后辅助节点调用 MLME-DISASSOCIATE.request 原语，迫使被测节点离网。该动作由测试员手动触发。

##### (4)使用上测试器

上测试器位于被测适配层协议之上，它使用适配层为上层提供服务，控制被测实现。

在 IP 报文头部解压和 IP 报文重组的测试中，需要观测适配层向上层提交的 IP 报文是否正确。但在默认状态下，被提交的 IP 报文从外部不可见。为此在适配层之上，设计了回环功能的上测试器。回环模块把下层提交的 IP 报文封装在新的 IP 报文中，重新通过适配层发送出去。这样就可以在无线

信道的数据帧里看到原来被提交的报文了。

类似地，在 IP 报文头部压缩和 IP 组播报文发送的测试过程中，需要适配层源发 IP 报文。这个协议动作一般无法通过 MAC 层激励。为此在适配层之上，设计了源发报文模块，模块中存放着需要发送的 IP 报文。当被测节点进入待测状态后，源发报文模块接收测试员发送过来的指令，把相应的 IP 报文交适配层发送。接着，通过观察无线信道上数据帧里的内容判断适配层的处理是否正确。

## 6 测试平台的实现

实际的测试平台如图 2 所示。

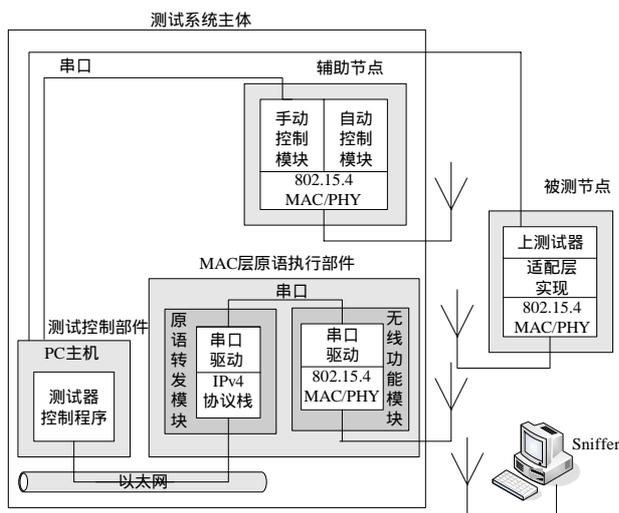


图 2 测试平台

Sniffer 采用 Daintree Networks 的产品。用它捕获和观测 802.15.4 无线信道上的报文。

被测节点、辅助节点和测试器的无线功能模块都使用了 Freescale 的 802.15.4 开发套件。开发套件硬件方面主要包括 MC9S08GT60 微控制器和 MC13192 无线收发器，MC9S08GT60 微控制器通过 SPI 控制 MC13192 无线收发器；软件方面由 Freescale 提供的 802.15.4 MAC/PHY 实现。

测试器由测试控制部件和 MAC 层原语执行部件组成。在 MAC 层原语执行部件上，无线功能模块的协议栈只有 802.15.4 MAC/PHY。原语转发模块工作在 ARM 平台上。它通过串口控制无线模块，发送和接收 802.15.4 MAC 原语。ARM 平台上本身运行了一个网络实验室自行研发的 IPv4 协议栈，通过以太网与测试器控制程序通信。测试器控制程序为测试员提供一个 802.15.4 MAC 层原语发送和接收的界面，它把测试员需要发送的原语封装在 UDP 报文中传输给原语转发模块。原语转发模块通过串口把原语转发给无线功能模块。原语转发模块同时还负责接收来无线模块的 confirm 和

(上接第 80 页)

总数超过 2 万。系统每天运行 4 h 左右，能够搜集近 200 万的新网页，这些网页的内容重复度约为 3。对增量式搜集而言，网页变化时间的预测是核心问题之一。对网页变化情况进行了半年跟踪，建立了测试集，测试结果准确性良好。

### 参考文献

- [1] 李晓明, 闫宏飞, 王继民, 等. 搜索引擎——原理、技术与系统[M]. 北京: 科学出版社, 2005-04.
- [2] Shkapenyuk V, Suel T. Design and Implementation of a High

Performance Distributed Web Crawler[C]//Proc. of the 18th ICDE Conf., San Jose, California, USA: [s. n.], 2002: 357-368.

在被测节点上，待测适配层的实现位于 802.15.4 MAC/PHY 之上。上测试器是测试系统的一部分，实现在被测节点，位于适配层之上。测试控制部件通过串口向上测试器发送命令，从而控制被测实现。

辅助节点与被测节点的硬件架构相同。在软件架构上，手动控制模块和自动控制模块分别位于 802.15.4 MAC 层之上。手动控制模块通过串口接收来自测试控制部件的命令、控制 MAC 层、激励被测节点。自动控制模块直接利用被测的适配层代码，自动模拟适配层行为。辅助节点虽然加载了整个适配层代码，但实际测试时只使用了适配层的一小部分功能，并且这些功能的正确性事先已经验证过，从而保证自动控制模块能正确地模拟适配层行为。

出于项目时间进度上的考虑，本文的测试平台以手动控制测试器为主，辅助节点的引入主要为了弥补手动控制的不足。将来，网络实验室会考虑升级测试器控制程序，使得测试控制部件能根据测试用例，自动控制一个或多个 MAC 层原语执行部件，激励被测节点，从而使测试更自动化。

## 7 结束语

本文基于分布式测试法，采用以测试目标为驱动的测试例设计方法。在测试过程中，发现了适配层实现中一些与所期望的协议规范不符合的地方。网络实验室之后改正了这些问题，从而完善了适配层的实现。测试达到了预期效果。进一步的工作是实现一个全自动的 6LoWPAN 测试系统。

### 参考文献

- [1] IEEE. 802.15.4-2003 Wireless Medium Access Control and Physical Layer Specifications for Low-rate Wireless Personal Area Networks[S]. 2003.
- [2] IETF. IPv6 over Low Power WPAN(6lowpan)[EB/OL]. [2006-07-07]. <https://onsite.ietf.org/html.charters/6lowpan-charter.html>.
- [3] Kushalnagar N. 6LoWPAN: Overview, Assumptions, Problem Statement and Goals Draft-ietf-6lowpan-problem-02[EB/OL]. (2006-02-24). <http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-6lowpan-problem-02.txt>.
- [4] Montenegro G. Transmission of IPv6 Packets over IEEE.802.15.4 Networks draft-ietf-6lowpan-format-02[EB/OL]. (2006-03-06). <http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-6lowpan-format-02.txt>.
- [5] ISO. ISO/IEC 9646-1:1994 OSI Conformance Testing Methodology and Framework for Protocol Recommendations for ITU-T Application-general Concepts[S]. 1994.