

基于6LoWPAN与MQTT的无线传感网络设计*

阳旺,樊振宇,吴帆

(中南大学信息科学与工程学院,湖南长沙 410083)

摘要:针对目前6LoWPAN无线传感网络设计与应用存在的可扩展性较差、与IPv4环境不兼容等问题,设计并实现了基于6LoWPAN与消息队列遥测传输(Message Queuing Telemetry Transport, MQTT)的无线传感网络。其中,无线传感网络节点作为MQTT客户端与MQTT服务器通信,边界路由器通过NAT64(Network Address Translation IPv6 to IPv4)实现无线传感网络节点与IPv4网络的通信。将所设计的无线传感网络应用到智能家居场景,评估了无线传感网络和边界路由器的性能,测试了系统功能的实现。结果表明,无线传感网络具有良好的连通性和稳定性,无线传感节点的数据上传与指令接收稳定可靠,边界路由器工作稳定,系统具有较好的性能。

关键词:6LoWPAN;MQTT;NAT64;无线传感网络;边界路由器

中图分类号:TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2019)01-161-08

Design of wireless sensor network based on 6LoWPAN and MQTT

YANG Wang, FAN Zhenyu, WU Fan

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: For the problem that 6LoWPAN (IPv6 low power wireless personal area network) wireless sensor network has poor scalability in design and application and is incompatible with IPv4 environment, a wireless sensor network based on 6LoWPAN and MQTT (message queuing telemetry transport) was designed and implemented. Among them, the wireless sensor network node works as MQTT client to communicate with MQTT server, and the border router implements communication between wireless sensor network node and IPv4 network through NAT64 (network address translation IPv6 to IPv4). Finally, the designed wireless sensor network was applied to the smart home scenario, the performance of wireless sensor network and border router was evaluated, and the implementation of the system function was tested. Results show that the wireless sensor network has good connectivity and stability, the data uploading and command receiving of the wireless sensor node is stable and reliable, the border router works stably, and the system has good performance.

Keywords: 6LoWPAN; MQTT; NAT64; wireless sensor network; border router

随着物联网的发展,无线传感网络被运用于越来越多的场景,需要联网的设备日益增多,采用 ZigBee 技术的传统无线传感网络面临着一些亟须解决的问题。ZigBee 技术虽然具有自组网、低功耗、安全性高和可靠性强等特点,但是其无法直接连接到互联网,ZigBee 节点在与外界通信时需要十分复杂的应用层专用网关,外界只是与网关相连,并没有实现物物相连^[1]。因此,国际互联网工程任务组(Internet Engineering Task Force, IETF)提出基于 IPv6 的低功耗无线个域网(IPv6 Low Power Wireless Personal Area Network, 6LoWPAN)标准^[2],使得 IP 网络得以扩展到无线传感器网络,真正意义上实现了无线传感网络节

点与互联网的互联互通。

随着 6LoWPAN 标准化进程的不断推进,6LoWPAN 技术日趋完善,但是现阶段,基于 6LoWPAN 的无线传感网络设计与应用还存在着一些亟待解决的问题。近年来,国内外研究学者对于 6LoWPAN 无线传感网络的设计与实现研究主要集中在以下三个方面:一是基于 6LoWPAN 的无线传感网络结构与优化研究^[3-5];二是 6LoWPAN 无线传感网络边界路由器的设计与实现研究^[6-8];三是 6LoWPAN 无线传感网络结合不同应用层协议实现在不同场景的应用研究^[9-11]。上述研究中基于 6LoWPAN 无线传感网络的应用,系统大多采用星型网络,可扩展性较

* 收稿日期:2017-11-10

基金项目:湖南省自然科学基金面上资助项目(2017JJ2332);中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2018zzts579)

作者简介:阳旺(1982—),男,湖南湘乡人,副教授,博士,博士生导师,E-mail:yangwang@csu.edu.cn

差。同时,由于 6LoWPAN 无线传感网络的 IPv6 环境与目前互联网的 IPv4 环境不兼容,手机等 IPv4 终端不能很好地实现对无线传感网络的远程监控。另外,对于智能家居、温室大棚和智能照明等具有小范围、小数据量特点的应用场景采用完全不同的设计方案并不实用。

针对上述问题,本文设计并实现了基于 6LoWPAN 与消息队列遥测传输(Message Queuing Telemetry Transport, MQTT)的无线传感网络系统,实现了无线传感网络节点与 IPv4 网络的端到端通信。通过 MQTT 协议构建了完整的消息转发系统,实现了无线传感网络节点上传到远程服务器以及远程客户端对无线传感网络节点的实时监控。最后还将系统部署到智能家居场景对无线传感网络和边界路由器进行了性能评估,提供了一个稳定可靠的 6LoWPAN 无线传感器网络框架。

1 6LoWPAN 与 MQTT 概述

1.1 6LoWPAN

6LoWPAN 是一种在 IEEE 802.15.4 标准基础上传输 IPv6 数据包的技术,它能够实现嵌入式节点设备的网络组网、数据分发等功能^[12]。6LoWPAN 为网络中每个设备配备一个 IPv6 地址,保证网络内所有节点都可以访问外部网络。6LoWPAN 无线传感网络边界路由器只负责数据转发,并不进行应用层数据处理,实现真正意义上的物与物通信。

6LoWPAN 协议模型如图 1 所示,其中,6LoWPAN 适配层以下的物理层和数据链路层均采用 IEEE 802.15.4 标准,其上层则采用 TCP/IPv6 协议栈,而应用层不仅支持 HTTP 协议,也支持为资源受限的嵌入式设备设计的受限应用协议(Constrained Application Protocol, CoAP)和 MQTT 等协议。

应用层	HTTP/CoAP/MQTT...
传输层	TCP/UDP/ICMPv6
网络层	IPv6
适配层	6LoWPAN
数据链路层	IEEE 802.15.4 MAC 层
物理层	IEEE 802.15.4 PHY 层

图 1 6LoWPAN 协议栈

Fig. 1 6LoWPAN protocol stack

要提供 LoWPAN 网络构建、报头压缩和链路层分片与重组等功能。

1.2 MQTT

MQTT 是一种基于代理的轻量级发布/订阅式的消息传输协议^[13],它使用 TCP/IP 提供网络连接,通过心跳包来保持 TCP 长连接以便实现实时消息推送。如图 2 所示,在 MQTT 协议中有三种身份:发布者、MQTT 代理、订阅者。MQTT 是多个客户端通过一个中央代理传递消息的多对多协议,消息的发布者和订阅者都作为客户端,消息代理作为服务器,消息发布者也同时可以是消息的订阅者。



图 2 MQTT 模型

Fig. 2 MQTT model

MQTT 提供一对多的消息发布,解除应用程序耦合,并且具有简单易用、协议开销低、支持大量连接和服务质量(Quality of Service, QoS)等优点,十分适合于资源受限的物联网场景。与 CoAP 协议相比,在较低丢包率的情况下,MQTT 消息具有更低的延迟;在使用默认协议参数的情况下,MQTT 提供了更好的吞吐量性能;在实现功能相同的情况下,MQTT 的发布/订阅的交互机制能有效减少传感器网络的数据流量^[14-15]。随着传感器网络规模的增加,发布/订阅模型交互机制的优势将更加明显。此外,MQTT 协议已经被应用于很多实际产品,其开源支持十分友好,部分物联网云平台也已支持 MQTT 协议,采用 MQTT 协议的无线传感网络可以更好地实现与云端的集成。

2 无线传感网络设计

2.1 无线传感网络系统框架设计

基于 6LoWPAN 与 MQTT 的无线传感网络是由多个 6LoWPAN 节点和一个 6LoWPAN 边界路由器组成的多跳网络。该无线传感网络结合远程服务器和远程客户端组成一个如图 3 所示的无线传感网络系统。在系统功能实现方面,无线传感网络节点主要实现数据采集与指令执行功能;6LoWPAN 边界路由器部分主要实现无线传感网络节点与远程服务器和远程客户端的互联互通、IPv6 与 IPv4 地址和协议转换以及无线传感网络节点管理功能;远程服务器则主要作为 MQTT 代理实现消息转发,并作为无线传感网络的远程数

据中心实现数据存储和管理功能;远程客户端则作为无线传感网络的远程控制终端实现对无线传感网络节点的远程监测与控制功能。

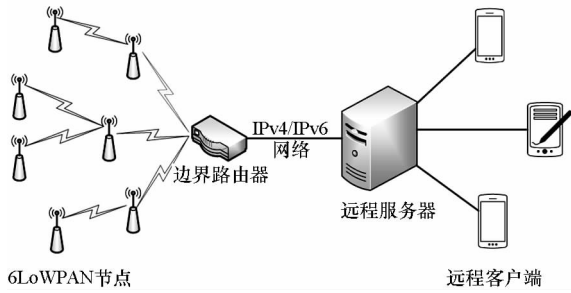


图3 无线传感网络系统

Fig.3 Wireless sensor network system

在系统安全方面,通过在MQTT代理服务器和边界路由器上启用UFW防火墙来防止针对本系统的恶意攻击。对于无线传感网络节点,考虑到其资源相对受限的特点,难以实现开销较大的传输层安全性协议/安全套接字(Transport Layer Security/Secure Sockets Layer, TLS/SSL)。因此,不仅采用MQTT协议的用户名密码认证机制对接入MQTT代理服务器的节点进行身份验证,还采用MQTT有效载荷加密机制。客户端采用轻量级椭圆曲线加密库micro-eccl^[16]对每个MQTT消息有效载荷的加密,MQTT代理服务器只负责转发消息,再由接收消息的客户端解密。

系统启动后,6LoWPAN节点自动获取网络前缀生成自己的IPv6地址,通过基于IPv6的低功耗无损无线局域网路由器(IPv6 Routing Protocol for Low power and lossy networks, RPL)路由协议构建以边界路由器为根节点的树型网络。无线传感网络节点和远程客户端通过MQTT协议连接并认证到远程服务器,然后通过MQTT消息实现交互。

2.2 6LoWPAN无线传感网络节点

2.2.1 功能需求

6LoWPAN无线传感网络节点分为感知节点和执行节点两类,感知节点感知环境数据并发送到远程服务器,而执行节点可以实现远程控制功能。无线传感网络节点要实现完整的6LoWPAN协议栈,并在应用层实现MQTT客户端功能,从而使节点能够与远程服务器和客户端实现数据交互。

2.2.2 硬件设计

无线传感网络节点硬件部分由6LoWPAN控制单元、传感器/执行器单元和供电单元组成,如图4所示。

6LoWPAN控制单元可采用单芯片解决方案、



图4 传感节点硬件架构

Fig.4 Sensor node hardware architecture

双芯片解决方案或网络处理器解决方案^[16]。其中,单芯片方案中使用片上系统射频技术,将射频模块和微控制器、闪存、内存等集成在一起,非常适用于对成本和体积有一定要求的无线传感节点。双芯片方案中,应用处理器和射频芯片是分开的,6LoWPAN协议栈与嵌入式应用要集成到同一块微控制器中,集成过程需要大量工程和测试工作。虽然网络处理器解决方案可以获得较大的性能提升,但是其成本也相对较高,不适合大部分无线传感网络场景。因此,单芯片解决方案更适合作为6LoWPAN无线传感网络节点的硬件设计方案。

传感器/执行器单元按照其指定的协议,使用相应的接口与6LoWPAN控制单元进行数据交换来实现数据采集和指令执行。6LoWPAN无线传感网络节点的供电单元则采用可充电的锂电池模块。

2.2.3 软件设计

1) 操作系统。无线传感网络节点通常会搭载嵌入式操作系统进行内存管理、底层驱动和网络协议实现等。目前,实现了6LoWPAN协议栈的主流嵌入式操作系统包括TinyOS、Contiki和RIOT^[17],其对比如表1所示。TinyOS是一个开源嵌入式操作系统,它使用专用的nesC进行开发,需要采用专用编译器,移植难度大。RIOT是一个新兴的专注于低功耗无线物联网设备的开源操作系统,它能够在众多平台上运行,而且拥有易于使用的应用程序接口(Application Programming Interface, API)。但是,目前基于RIOT实现的边界路由器存在程序执行不稳定以及6LoWPAN网络和其他网络之间的连通性差等问题,因此它不适合组建多跳网络。而Contiki完全采用C语言开发,并且基于事件驱动,具有可移植性好、对硬件要求低等优点,被广泛应用于6LoWPAN无线传感网络。另外,与TinyOS的伯克利低功耗IP协议栈(Berkeley Low-power IP stack, BLIP)协议栈相比,Contiki中的uIP协议栈更加侧重IP功能,在组网方面更加出色。综合考虑无线传感网络的实际需求、稳定性以及系统的成熟度等,无线传感网络节点采用Contiki系统。

表 1 操作系统对比

Tab. 1 Comparison of operating systems

操作系统	最小 RAM/KB	最小 ROM/KB	开发语言
TinyOS	< 1	< 4	nesC
Contiki	< 2	< 30	C
RIOT	≈ 1.5	≈ 5	C/C++

2) 程序设计与实现。在节点的程序设计与实现中,感知节点与执行节点的基本程序执行流程如图 5 所示。无线传感网络节点启动后首先进行系统初始化,然后启动 MQTT 线程,向 MQTT 代理服务器发送连接请求并进行认证,认证成功后则会订阅相关主题并通过发送心跳包来保持 TCP 长连接。不同的是,感知节点会进行周期性数据采集,然后将数据发布到 MQTT 代理服务器。执行节点则在启动 MQTT 线程后一直等待远程客户端的控制命令,一旦收到远程客户端对于指定主题发送的消息,它就会触发相应的事件,然后根据指令执行相应的处理程序。

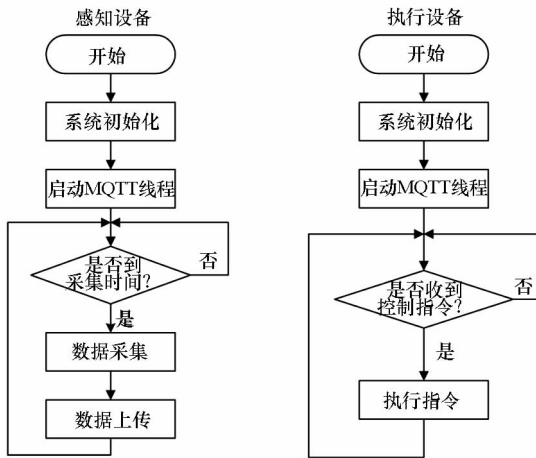


图 5 感知节点与执行节点程序流程

Fig. 5 Sensor node and actuator node program flow

在基本程序执行流程中, MQTT 线程是至关重要的,它涉及数据的上传与控制指令的下发。程序启动后就会激活 MQTT 线程,在 MQTT 线程中实现了一个如图 6 所示的状态机,该线程通过定时器来定期检查 MQTT 状态并实现状态切换。首先, MQTT 线程调用 MQTT 初始化函数,初始化完成后调用 mqtt_register 函数注册 MQTT 引擎。然后,节点尝试加入以 6LoWPAN 边界路由器为根节点的 6LoWPAN 网络,成功加入网络后节点向 MQTT 代理发起 MQTT 连接并进行认证,认证成功后即可向 MQTT 代理订阅或发布 MQTT 消息。当出现断开连接事件,即节点与 MQTT 代理失去连接,节点会马上尝试进行 MQTT 重连以恢

复到连接状态。如果重连次数达到设定的最大尝试次数,它就会转换到错误状态。

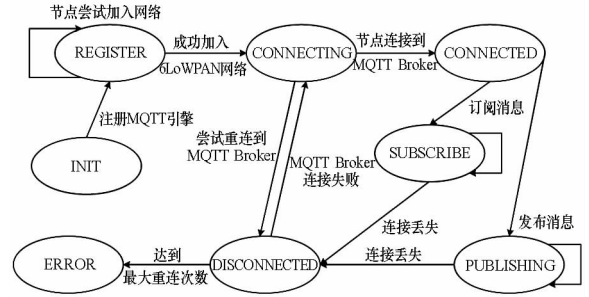


图 6 MQTT 状态机

Fig. 6 MQTT state machine

2.3 6LoWPAN 边界路由器

2.3.1 功能需求

6LoWPAN 边界路由器的主要功能需求是实现 6LoWPAN 无线传感网络和以太网的互联,即实现数据的双向转发。另外,无线传感网络节点中运行了 6LoWPAN 协议栈,所传输的都是 IPv6 的数据包,而目前 IPv6 网络还未全面普及,远程服务器和远程客户端都处于 IPv4 环境。因此,还要在边界路由器实现 IPv6 与 IPv4 网络地址和协议的转换。

2.3.2 设计方案

边界路由器采用如图 7 所示的基于 Contiki 系统的 CETIC - 6LBR 设计方案^[18-19],它能够连接基于 6LoWPAN 的无线传感器网络和基于以太网的现有 IP 有线网络。CETIC - 6LBR 方案是在 Contiki 系统之上模拟出第二个接口,不需要对 uIP 协议栈进行大量修改,它还实现了基于 RPL 的多跳网络管理。此外,CETIC - 6LBR 边界路由器还提供 Web 访问接口,通过该接口可以获取 6LoWPAN 无线传感网络的基本状态信息,并实现对其高效快捷的配置与管理。

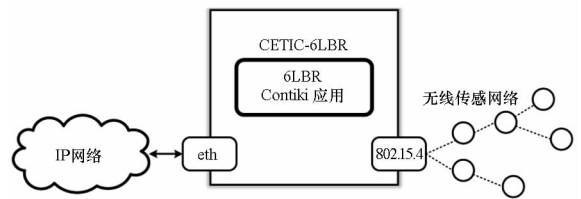


图 7 CETIC - 6LBR 设计方案

Fig. 7 CETIC - 6LBR design scheme

2.3.3 硬件设计

CETIC - 6LBR 支持多种硬件实现方案,主要分为两类:

1) MCU-Hosted 方案。MCU-Hosted 方案如

图 8 所示,它采用一个运行 Contiki 操作系统的无线传感网络节点与一台 Linux 主机组合的方式来实现边界路由器。此方案中 Contiki 节点只负责数据转发,CETIC-6LBR 运行在 Linux 主机,数据处理全部由 Linux 主机完成,Contiki 节点与 Linux 主机之间通过串行线路网际协议(Serial Line Internet Protocol,SLIP)进行数据传输。

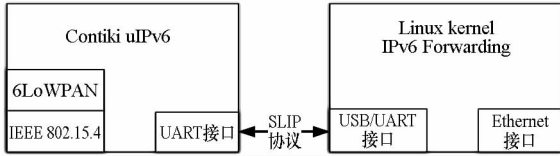


图 8 MCU-Hosted 方案

Fig. 8 MCU-Hosted scheme

2) MCU-Ethernet 方案。MCU-Ethernet 方案如图 9 所示,它包含一个运行 Contiki 操作系统的无线传感网络节点和一个以太网控制器。此方案不使用 Linux 主机,而是在 Contiki 节点运行轻量级的 CETIC-6LBR,数据包转发与处理都由 Contiki 节点完成,以太网控制器与 Contiki 节点之间使用串行外设接口(Serial Peripheral Interface,SPI)协议进行数据传输。

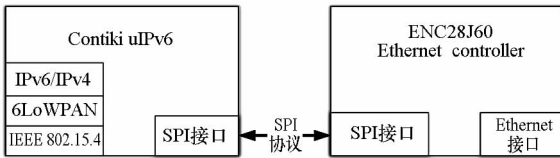


图 9 MCU-Ethernet 方案

Fig. 9 MCU-Ethernet scheme

由于 MCU-Ethernet 方案中 Contiki 节点的计算能力有限,所以只能采用 CETIC-6LBR 的轻量级版本,这会限制整个网络的处理能力,其稳定性、可靠性都无法保证。而 MCU-Hosted 的 Linux 主机可以提供强大的计算能力,运行将更稳定、更可靠。因此,本系统采用 MCU-Hosted 方案实现边界路由器。

2.3.4 软件设计

根据 MCU-Hosted 方案,Contiki 节点需要设计数据传输程序,一方面从无线收发器中读取来自无线传感网络节点的数据包并通过串口转发给 Linux 主机进行处理;另一方面从串口接收来自 Linux 主机的数据包并将其通过无线收发器发送给无线传感网络节点。

Linux 主机移植 CETIC-6LBR 方案的开源实现,并参考其开发文档对其进行配置。在转发数据包功能的设计上,CETIC-6LBR 支持三种运行

模式:智能网桥模式、路由器模式和透明网桥模式。在路由器模式中,CETIC-6LBR 为具有不同 IPv6 地址前缀的以太网和无线传感网络提供路由功能,实现以太网和 6LoWPAN 无线传感网络两个 IPv6 子网的互联。由于该模式以运行 CETIC-6LBR 的边界路由器作为 RPL 实例的根节点,无线传感网络节点作为 RPL 实例的子节点,因此可以更好地实现对整个 6LoWPAN 无线传感网络的管理。综合考虑数据转发性能与无线传感网络的管理功能,边界路由器采用路由器模式。

在 IPv6 和 IPv4 互联的设计上,目前比较成熟的方案是采用 IETF 提出的 NAT64 协议。NAT64^[20]是一种有状态的网络地址与协议转换技术,它可以实现 TCP、UDP、ICMP 协议下的 IPv6 与 IPv4 网络地址和协议转换。6LoWPAN 无线传感网络是纯 IPv6 环境,无线传感节点编程时要使用熟知前缀::ffff:0:0/96 或 64:ff9b::/96 与要访问的 IPv4 地址组合成 IPv6 地址。然后,在边界路由器通过 NAT64 解析出该 IPv4 地址并进行数据包转换,反之,则将 IPv4 转换成 IPv6。CETIC-6LBR 方案已经集成了 Contiki 操作系统中 NAT64 模块的扩展版,在 CETIC-6LBR 中启用并配置好 NAT64 模块即可实现网络地址和协议的转换功能。

3 性能评估

3.1 评估配置

根据 6LoWPAN 无线传感网络的设计方案,本文选择智能家居系统作为应用场景,设计与实现了包含 5 个无线传感节点、1 个边界路由器、1 个远程服务器和客户端的智能家居系统,并进行了性能评估。无线传感网络节点硬件平台的控制单元采用 cc2538dk(development kits),外接的传感器/执行器单元中感知节点包括温湿度传感器、气体烟雾传感器、人体红外感应器,执行节点包括 RGB 三色灯和继电器开关。

边界路由器由 Raspberry Pi 3 Model B 与 cc2538dk 组成,Raspberry Pi 与 cc2538dk 之间的连接采用通用串行总线(Universal Serial Bus,USB)转逻辑门电路(Transistor-Transistor Logic,TTL)模块连接,并采用 SLIP 协议实现数据传输。Raspberry Pi 采用 Raspbian 操作系统,在其上移植 CETIC-6LBR 方案的开源实现,cc2538dk 上基于 Contiki 操作系统运行数据传输程序,实现无线接口与串口的数据转发。远程服务器采用 Ubuntu

操作系统,在其上基于开源 MQTT 代理 Mosquitto 实现 MQTT 代理功能。远程客户端则基于 Android 平台开发了具有 MQTT 客户端功能、支持数据获取与展示的 App。

系统搭建完成后将其部署到普通家庭环境中,使用笔记本电脑作为测试工具。按照如图 10 所示的评估配置,将笔记本电脑连接上 WiFi 网络,然后将 WiFi 网络共享给以太网卡,使用网线连接笔记本电脑和 Raspberry Pi 的以太网接口,最后对笔记本电脑进行相应的网络设置。

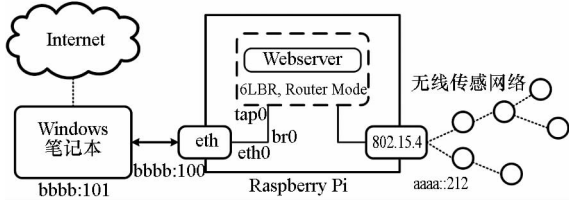


图 10 评估配置
Fig. 10 Evaluation configuration

3.2 无线传感网络性能评估

系统启动后,在笔记本电脑中访问 CETIC - 6LBR 提供的 Web 服务器可以获得 6LBR 的状态信息包括 IPv6 地址、前缀以及启用 NAT64 后获得的局域网 IPv4 地址信息,还可以获得无线传感网络的拓扑结构以及节点的地址和状态等信息。如图 11 所示,无线传感网络由边界路由器和 5 个传感节点组成。

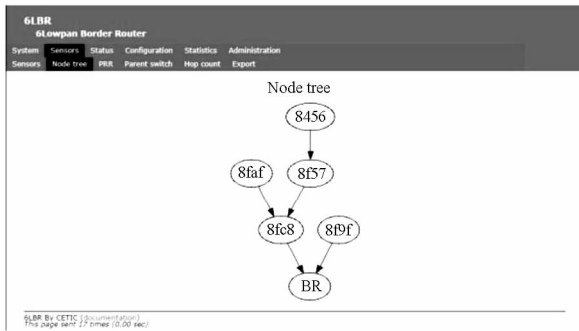


图 11 网络拓扑结构
Fig. 11 Network topology

在运行 Windows 操作系统的笔记本电脑上使用 PSPing 工具测试不同有效载荷大小的 ICMPv6 报文到达节点的往返时间,获得了树型拓扑中每一层节点的平均往返时间 (Round-Trip Time, RTT) 值。如图 12 所示的测试结果表明,随着树的层次增加,RTT 值越大,同时,随着有效载荷的增大,RTT 值也越大。当有效载荷为 56 B 时,ICMPv6 报文为 64 B,封装成 IPv6 报文后达到 104 B,已经超过 IEEE 802.15.4 有效载荷 102 B

的限制。由于数据包需要在 6LoWPAN 适配层进行报头压缩、报文分片与重组等处理,这会带来一定的时间开销,所以 RTT 值出现了较大的增长,但是没有出现丢包的情况。总之,从测试结果来看,往返时延较低,除了分片重组带来较大的延时变化外,其他方面对通信时延带来的影响较小。链路较为稳定,符合预期,验证了所设计的无线传感网络良好的连通性与稳定性。

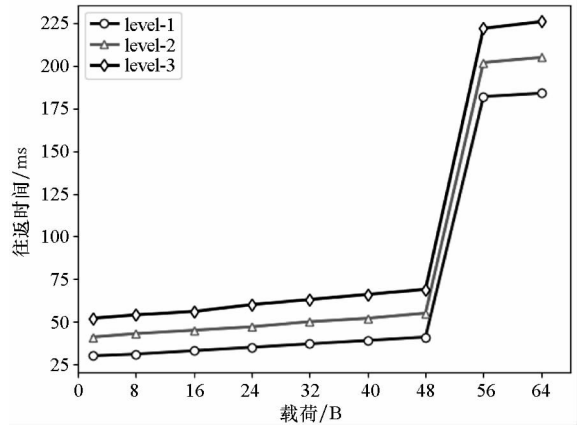


图 12 有效载荷与往返时间
Fig. 12 Payload size versus round-trip time

3.3 边界路由器性能评估

在 Raspberry Pi 的 Linux 操作系统中,使用性能监测工具 pidstat 实时监测 CETIC - 6LBR 进程的 CPU 使用率。为防止报头压缩、报文分片与重组等操作影响边界路由器性能测试,本文只使用有效载荷为 8 B、16 B 和 32 B 的 ICMPv6 报文在 20 ms、50 ms、100 ms、200 ms 和 400 ms 等不同间隔下进行 Ping 测试。同时,实时监测边界路由器 CETIC - 6LBR 主进程的 CPU 使用率,每次测试统计了 100 s 内的平均 CPU 使用率。

测试结果如图 13 所示,当 Ping 的间隔小于

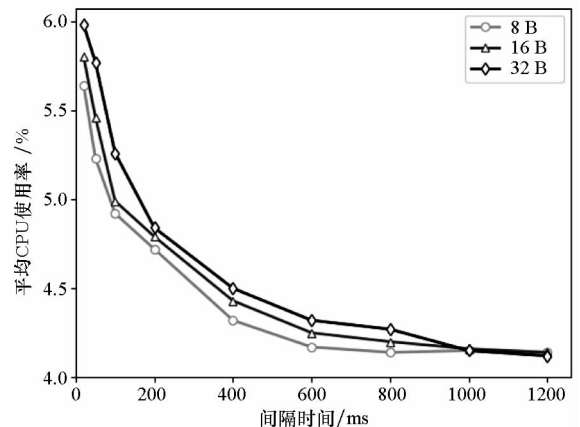


图 13 Ping 间隔时间与平均 CPU 使用率
Fig. 13 Ping interval versus average CPU utilization

1000 ms 时,随着 Ping 间隔的减小,CPU 使用率增加;同时,当 Ping 的间隔一定时,ICMPv6 报文的载荷越大,平均 CPU 使用率越高。当 Ping 的间隔大于 1000 ms 时,平均 CPU 使用率会趋于平稳。由于间隔较大,流经边界路由器的流量较小,只需要较少的 CPU 资源即可完成处理,所以平均 CPU 使用率会稳定在 4% 附近。当使用载荷为 32 B 的 ICMPv6 报文在间隔为 20 ms 的情况下进行测试时,边界路由器需要处理的流量最大,但是 CETIC-6LBR 主进程的平均 CPU 使用率依然不会超过 6%。由于无线传感网络的流量通常相对较小,因此本系统所设计的边界路由器具有一定的稳定性和可靠性。

3.4 系统功能评估

系统启动后各个节点会按照设定的程序工作,查看 Android 客户端的数据如图 14 所示。其中,温湿度数据正常显示,气体烟雾节点和红外人体传感节点工作正常。当出现烟雾或者人体靠近红外人体传感器时,Android 客户端会迅速接收到警报信息。测试 RGB 灯和继电器开关的控制按钮,观察到无线传感节点能够迅速做出相应的响应。经过多次测试,系统各项功能表现良好,无线传感网络运行稳定,表明系统设计方案合理,验证了系统的可靠性。



图 14 远程客户端数据显示

Fig. 14 Remote client data display

4 结论

本文设计并实现了基于 6LoWPAN 与 MQTT 技术的无线传感网络,无线传感网络节点运行完整的 6LoWPAN 协议栈,应用层采用 MQTT 协议实现 MQTT 客户端功能,边界路由器采用 CETIC-6LBR 方案,并通过 NAT64 实现无线传感

网络节点与 IPv4 网络的通信。最后,将其应用到智能家居场景,搭建了包含 6LoWPAN 无线传感网络节点、边界路由器、远程服务器和远程客户端的无线传感网络系统,并对无线传感网络与边界路由器进行了性能评估,验证了基于 6LoWPAN 与 MQTT 的无线传感网络设计的合理性与可靠性。后续,将对所设计的无线传感网络进行更深入的性能评估与优化,使其具有更好的可扩展性,以便适用于更多的应用场景。

参考文献 (References)

- [1] Toscano E, Bello L. Comparative assessments of IEEE 802.15.4/ZigBee and 6LoWPAN for low power industrial WSNs in realistic scenarios [C]//Proceedings of the 9th IEEE International Workshop on Communication Systems, 2012: 115-124.
- [2] Montenegro G, Kushalnagar N, Hui J, et al. Transmission of IPv6 packets over IEEE 802.15.4 networks: RFC 4944[R]. USA: Internet Engineering Task Force, 2007.
- [3] 向浩,李莹,袁家斌.基于 6LoWPAN 的 IPv6 无线传感器网络[J].南京理工大学学报:自然科学版,2010,34(1):56-60.
XIANG Hao, LI Kun, YUAN Jiabin. IPv6 wireless sensor network based on 6LoWPAN [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2010, 34(1): 56-60. (in Chinese)
- [4] Pediredla B, Wang K I, Salcic Z, et al. A 6LoWPAN implementation for memory constrained and power efficient wireless sensor nodes [C]//Proceedings of 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2013: 4432-4437.
- [5] Luo B Q, Sun Z X. Enabling end-to-end communication between wireless sensor networks and the internet based on 6LoWPAN [J]. Chinese Journal of Electronics, 2015, 24(3): 633-638.
- [6] da Silva Campos B, Rodrigues J, Oliveira L M L, et al. Design and construction of a wireless sensor and actuator network gateway based on 6LoWPAN [C]//Proceedings of International Conference on Computer as a Tool, 2011: 1-4.
- [7] 陈开锋,陈明,冯国富.基于 NAT64 的 6LoWPAN 边缘路由器设计[J].传感器与微系统,2016,35(7):94-96.
CHEN Kaifeng, CHEN Ming, FENG Guofu. Design of 6LoWPAN edge router based on NAT64[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(7): 94-96. (in Chinese)
- [8] Kamma P K, Palla C R, Nelakuditi U R, et al. Design and implementation of 6LoWPAN border router [C]//Proceedings of Thirteenth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks, 2016.
- [9] 王晓晴,殷旭东.基于 6LoWPAN 无线传感器网络的农业环境实时监控系統[J].农业工程学报,2010,26(10):224-228.
WANG Xiaonan, YIN Xudong. Agricultural environment real-time monitor and control system based on 6LoWPAN sensor networks [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(10): 224-228. (in Chinese)

- [10] Castro M, JaraA J, Skarmeta A F G. Smart lighting solutions for smart cities [C]//Proceedings of the 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, 2013: 1374 - 1379.
- [11] Han S N, Cao Q H, Alinia B, et al. Design, implementation, and evaluation of 6LoWPAN for home and building automation in the internet of things[C]//Proceedings of the 12th IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications, 2015.
- [12] Mulligan G. The 6LoWPAN architecture [C] //Proceedings of the 4th Workshop on Embedded Networked Sensors, 2007: 78 - 82.
- [13] Deschambault O, Gherbi A, Legare C. Efficient implementation of the MQTT protocol for embedded systems[J]. Journal of Information Processing Systems, 2017, 13(1): 26 - 39.
- [14] Thangavel D, Ma X P, Valera A, et al. Performance evaluation of MQTT and CoAP via a common middleware[C]// Proceedings of the 9th International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, 2014.
- [15] Collina M, Bartolucci M, Vanelli-Coralli A, et al. Internet of things application layer protocol analysis over error and delay prone links [C]//Proceedings of the 7th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 13th Signal Processing for Space Communications Workshop, 2014: 398 - 404.
- [16] Micro-ecc. ECDH and ECDSA for 8-bit, 32-bit, and 64-bit processors [Z]. [2017 - 11 - 02] <https://github.com/kmackay/micro-ecc>.
- [17] Schappacher M, Schmitt E, Sikora A, et al. A flexible, modular, open-source implementation of 6LoWPAN [C]// Proceedings of Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, 2015: 838 - 844.
- [18] Github, Inc. A deployment-ready 6LoWPAN border router solution based on Contiki [Z]. [2017 - 11 - 02]. <https://github.com/cetic/6lbr>.
- [19] 张岩. 基于 Contiki 系统的物联网应用平台设计与实现 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
ZHANG Yan. Design and implementation of an application platform for internet of things based on Contiki [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013. (in Chinese)
- [20] Bagnulo M, García-Martínez A, van Beijnum I. The NAT64/DNS64 tool suite for IPv6 transition [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(7): 177 - 183.