

一种基于 IPv6 和低功耗蓝牙的物联网体系结构

王剑锋¹ 陈灿峰² 刘嘉² 郝闯军²

(中国科学技术大学软件学院 合肥 230026)¹ (诺基亚无线通信研究院 北京 100176)²

摘要 无线传感器网络是一种有效的感知和研究物理世界的媒介,如何把无线传感器网络与因特网更好地融合是当前研究的热点。提出了一种低功耗蓝牙节点和因特网互联的体系结构,它完全基于 IPv6 架构,能为无线传感器网络和因特网的节点提供端到端的 IPv6 连接。介绍了如何在能量和处理能力受限制的低功耗蓝牙节点上实现轻量级的 IPv6 协议栈,并且根据低功耗蓝牙传感节点的特性,设计和实现了 IPv6 报头压缩、数据包的分段与重组等功能;同时在应用层实现了 CoAP 协议。实际测量结果表明,本系统传输延迟时间小,低功耗蓝牙节点具有较低的存储和能量消耗,可以满足长时间运行的需求。

关键词 IPv6,低功耗蓝牙,CoAP,无线传感器网络,6LoWPAN

中图分类号 TP393.0 **文献标识码** A

Internet of Things Architecture Based on IPv6 and Bluetooth Low Energy

WANG Jian-feng¹ CHEN Can-feng² LIU Jia² XI Min-jun²

(School of Software Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)¹

(Radio Systems Lab, Nokia Research Center, Beijing 100176, China)²

Abstract Wireless sensor networks are an efficient method to sense and study the physical environment, and how to seamlessly converge wireless sensor networks with Internet is one hot research topic. A complete IPv6-based Internet of Things architecture was proposed, which enables end-to-end IPv6 connectivity between the Bluetooth low energy networks and the Internet. One lightweight IPv6 protocol stack was implemented on the constrained Bluetooth low energy nodes. According to the characteristics of Bluetooth low energy, the lightweight IPv6 protocol stack provides 6LoWPAN-optimized functions such as IPv6 header compression, packet Segmentation and Reassembly. The CoAP protocol was also implemented in the application layer. The actual measurement results show that the system has a low time delay and the Bluetooth low energy node has very low power consumption which can satisfy the requirements for long-time operation.

Keywords IPv6, Bluetooth low energy (BLE), Constrained application protocol (CoAP), Wireless sensor networks (WSN), IPv6 over low power wireless personal area networks(6LoWPAN)

1 引言

蓝牙 4.0 规范引入了低功耗蓝牙(Bluetooth Low Energy, BLE)技术。低功耗蓝牙是一种低能耗、低延迟、低成本的无线通信技术。与传统蓝牙相比,低功耗蓝牙同样使用 2.4 GHz 频段,但其将信道重新划分为 40 个,包含 37 个数据信道和 3 个广播信道(传统蓝牙共使用 79 个信道)^[1];低功耗蓝牙的协议栈大大简化,其状态机和连接过程也进行了优化;低功耗蓝牙设备可在数毫秒内建立连接,收发数据时所需的峰值电流低至 mA 级别,同时待机状态需要的电流可下降至 μ A 级别^[9]。

无线传感网中,大量的低功耗蓝牙传感节点通过各种传感器捕获到大量环境数据,与因特网融合,可实现用户远程的

环境感知。无线传感网与因特网在物理层和协议标准方面都存在异构性,如何把两者互联并实现物与物、人与物之间的信息交互成为当前无线传感网和物联网领域研究的热点。在使用基于代理^[4](proxy-based)的方式下,传感数据由无线传感网中的传感节点采集,并传输到汇聚节点(sink-node),进行网络协议转换后再转发到因特网。汇聚节点作为无线传感网与因特网之间的代理,起着应用层网关的作用。虽然基于代理的方式能够实现传感网与因特网之间信息的交互,但这种方案存在一些问题:汇聚节点必须采用特殊的设计来保证足够的处理能力;当无线传感网的节点运行不同的应用层协议时,汇聚节点需要为所有应用层协议做协议转换,这大大增加了网关设计的复杂度和设备互联的难度;汇聚节点作为异构网络互联的关键节点,如果失效,将会影响到整个网络的正常工作。

到稿日期:2012-07-21 返修日期:2012-11-09 本文受国家自然科学基金项目(61170296)资助。

王剑锋(1987—),男,硕士生,主要研究方向为嵌入式系统、移动互联网;陈灿峰(1978—),男,博士,主任研究员,主要研究方向为物联网、移动与嵌入式计算、移动互联网服务等,E-mail: canfeng-david.chen@nokia.com;刘嘉(1982—),男,博士,研究员,主要研究方向为传感器网络、宽带通信网络、网络性能评价等;郝闯军(1982—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为物联网与移动互联网相关的无线传输技术及应用。

随着无线传感网与因特网互联技术研究的深入,基于 IP (IP-based)^[3]的异构网络互联方式逐渐被应用到无线传感网与因特网的互联中。IP 机制的引入能够屏蔽网络底层的差异,从而实现传感数据在异构网络中的透明传输。基于 IP 的方式要求在传感节点上实现 IP 架构,将传感网融合到 IP 技术体系中。IPv6 作为下一代互联网的标准协议,能够提供更大的地址空间,加入了地址自动配置的功能。在无线传感网节点上支持轻量级的 IPv6 协议栈,使得无线传感网能够利用现有的基于 IP 的服务、工具与应用;同时能够与已经广泛部署的各种 IP 网络实现无缝连接。

基于 IPv6 来实现异构网络的互联,在无线传感节点上实现 IPv6 架构面临着诸多挑战和制约,包括计算能力的限制、电池能量和存储空间的限制。但是近年的研究表明,在无线传感节点上实现轻量级 IP 协议栈是可行的^[2]。NSv6、BSN、 μ IPv6、LwIP 等^[4]轻量级 IP 协议栈,能够满足无线传感节点的特殊需求。IETF 的 6LoWPAN (IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks) 工作组,致力于推动 IPv6 在基于 IEEE 802.15.4 的无线传感网中的使用^[6]。Culler 等人在 Crossbow 公司的 TelosB 节点上实现了世界上第一个完整的 IPv6/6LoWPAN 架构^[7]。实验结果表明,在综合考虑电量消耗、传输延迟和系统负担多种因素的情况下,基于 IPv6 的实现具有良好的效果。

为了将 IPv6 机制和低功耗蓝牙技术应用于物联网中,本文提出了一种基于 IPv6 和低功耗蓝牙技术的物联网体系结构。后续各节将介绍体系结构,详细描述各功能模块的设计以及实验结果与性能评测。

2 体系结构

本节针对 BLE 传感网与因特网互联的需求,提出了基于低功耗蓝牙技术和 IPv6 的物联网体系结构,并且详细介绍了该体系结构的拓扑和协议栈层次。

2.1 系统拓扑结构

本文提出的基于 IPv6 和低功耗蓝牙的物联网体系结构,其拓扑如图 1 所示。

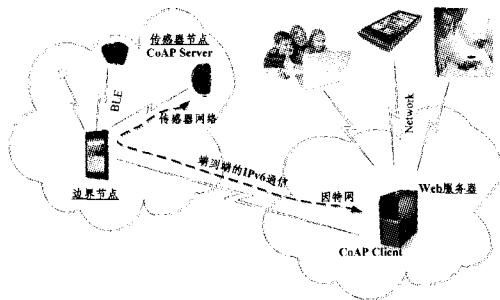


图 1 系统拓扑结构图

图 1 系统拓扑结构中的边界节点处于无线传感网与因特网的交界处。一方面,边界节点支持低功耗蓝牙技术,与多个 BLE 传感节点构成无线传感网。低功耗蓝牙设备分为 Master 和 Slave 两类角色。一个 Master(边界节点)同时连接多个 Slave,从而组成星形拓扑的无线传感网。另一方面,边界节点能够通过 GPRS/3G、WiFi 或者以太网等方式连接到因特网。该体系架构中的每一个传感节点都必须支持 IPv6,传输的数据都必须满足 IPv6 数据包格式。边界节点只需完成

路由功能就能在异构网络间转发 IPv6 数据包,实现数据在 BLE 传感网与因特网之间的透明传输,同时可避免基于代理的方式进行协议转换的过程。

为了给用户友好的数据访问的方式和服务,应用层可以使用 CoAP (Constrained Application Protocol) 协议。IETF 的 CoAP 协议采用了 HTTP 协议的一些机制,传输层使用 UDP 协议,工作时资源消耗低,适用于基于 IP 的物联网。在 CoAP 协议实现中,CoAP 服务器运行在传感节点上,响应来自 CoAP 客户端的请求。Web 服务器负责处理因特网用户发起的 HTTP 请求,作为 CoAP 客户端来访问传感节点。

2.2 系统协议层次结构

在蓝牙 4.0 的规范中,BLE 协议栈分为主机(Host)和控制器(Controller)两大部分。控制器部分实现了低功耗蓝牙的物理层和链路层协议;主机部分由下至上包括逻辑链路控制与适配协议(L2CAP)、通用访问规范(GAP)、属性协议(ATT)和通用属性规范(GATT)。本文提出的架构使用了蓝牙 4.0 规范定义的部分协议;在 L2CAP 层以上,使用 IPv6 协议栈及其相关模块。整个系统的协议层次结构如图 2 所示。在传感节点和 Web 服务器之间可以实现端到端的通信,而边界节点根据通信双方的地址对 IPv6 数据包进行路由转发。传感节点设备自身能力受限,需解决的首要问题是实现一个可以在 8 位 MCU 上运行的轻量级 IPv6 协议栈。 μ IPv6^[3]是一个针对能力受限的设备设计的开源的轻量级 TCP/IP 协议栈。 μ IPv6 实现了 TCP、UDP、IPv6、ICMPv6 和邻居发现等功能,其运行时只需要不到 2kB 的 RAM 和 11.5kB 的代码空间。 μ IPv6 符合 BLE 传感节点的硬件限制,并提供主要的 IPv6 机制的功能集。

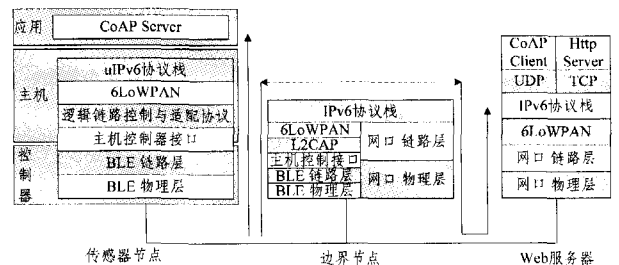


图 2 协议层次结构图

CoAP 基于 REST (Representational State Transfer) 结构,提供了类似 HTTP 操作(如 GET、PUT、POST)的方式来访问实体数据^[11]。只要在传感节点上实现 CoAP 协议,用户就可以直接通过浏览器来访问传感节点采集的数据。这样不仅实现了传感网与因特网的融合,而且实现了与 Web 的融合,这样的网络可以叫做 WoT (Web of Things)。

L2CAP 层之上的数据报在不经压缩的情况下,网络层和传输层的头部长度至少为 48Bytes,因而需要实现报头压缩的机制来降低传输报头信息的负担。本设计中的报头压缩功能可以把 IPv6/UDP 的头部压缩到 5Bytes;当源地址和目的地址都为本地链路地址(Link-local Address)时,甚至可以压缩到 4Bytes。此外,由于低功耗蓝牙链路层支持的最大净荷长度为 23Bytes,当传输的 IP 数据包长度超过最大净荷长度限制时,还需要进行数据包的拆分与重组。

3 系统设计

本节介绍了在低功耗蓝牙设备上端到端通信所依赖的各功能模块的设计与实现,包括面向低功耗蓝牙的 6LoWPAN、 μ IPv6 及 CoAP 的移植。

3.1 6LoWPAN

6LoWPAN 工作组已经制定了 IPv6 在 IEEE 802.15.4 网络上的应用方案。与 IEEE802.15.4 相比,低功耗蓝牙有着不同的最大链路层帧长度与网络拓扑结构。针对低功耗蓝牙,本文定义了报文分片与重组、IPv6 自动地址配置和报头压缩功能。

3.1.1 报文分片与重组

当报文长度超过 BLE 链路层数据帧定义的 MTU 时,需要把报文切分成不同的片段,然后这些片段才能通过 BLE 的链路层和物理层发送出去。为了能够传输长度超过 L2CAP 层 MTU 的 PDU(Protocol Data Unit),蓝牙 4.0 规范定义了 SAR(Segmentation and Reassembly)和 FAR(Fragmentation and Recombination)两种方法。SAR 和 FAR 都可以把一个大的数据包拆分成几个小的数据段,并在接收端重组为一个完整的数据包。但是两者也存在明显的区别,SAR 在 L2CAP 层实现,FAR 在 L2CAP 层之下的 HCI 实现。FAR 是当前蓝牙 4.0 规范定义的方法,但是没有强制要求蓝牙芯片实现 FAR;而当前还没有低功耗蓝牙芯片厂商(TI、Broadcom、CSR、Nordic 等)支持 FAR。

类似地,已知的 BLE 协议栈也没有实现 SAR 功能。但 SAR 是在 L2CAP 层之上实现的,因此可重用蓝牙 4.0 规范针对传统蓝牙(非低功耗蓝牙)定义的 L2CAP 层的 I-frame (Basic Information Frame)来实现 SAR。I-frame 的帧格式如图 3 所示。

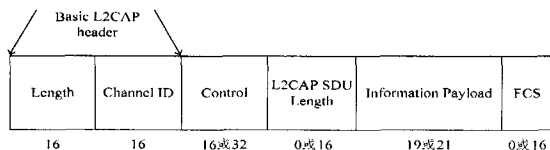


图 3 I-frame 帧格式

在 I-frame 帧结构中,Information Payload 字段用来存放需要传输的数据。L2CAP SDU Length 字段表示整个 L2CAP 层 SDU 的长度。Control 字段的最高两位被用作 SAR 的标志位,表示是否分段以及分段的序号。SAR 标志位不同的值表示不同分段含义,00 表示没有分段的 L2CAP 层的 SDU,发送的是一个完整的数据报;01 表示有分段 SDU 的第一个分片;10 表示分段的 SDU 的最后一个分片;11 表示中间分片。

蓝牙 4.0 规范没有定义专门的 L2CAP 信道来传输 IPv6 数据包,因此规范^[5]重新定义了一个 ID 为 0x0007 的 L2CAP 层信道。

3.1.2 地址配置

在基于 IPv6 的无线传感网中,每一个传感节点都会拥有 IPv6 地址。一个典型的 IPv6 地址由 3 部分组成:全局路由前缀、子网 ID 和接口 ID。IPv6 地址的配置方式分为手动地址配置和自动地址配置两种方式。自动地址配置方式又分为无状态的地址配置和有状态的地址配置两种方式。无状态的地址自动配置方式利用路由器宣告的路由地址前缀和接口 ID

计算出全局单播地址。针对 BLE 的传感器节点,本文使用无状态地址自动配置的方式。

每一个 BLE 传感节点都拥有唯一的 48bit 蓝牙设备地址 (BD_ADDR)。节点的接口 ID 是由 BD_ADDR 通过 EUI64 (IEEE 定义的基于 64 位的扩展唯一标示符)转换算法得到的。EUI64 转换算法把蓝牙设备地址第一个字节的第二位求反,并在第三和第四字节之间插入两个字节的常量值 0xFFFE,从而生成 64bit 接口 ID;再加上路由前缀 FE80::/64,便生成了一个 128bit 的本地链路地址。利用 128bit 的本地链路地址,低功耗蓝牙传感节点可以与边界路由节点组成一个 IPv6 的局域网。

3.1.3 报头压缩

在不影响网络通信的前提下,报头压缩功能可以减小无线传感节点间通信的数据量。IPv6 报头压缩功能通常需要压缩两类信息:第一类是可以直接去掉的一些值域,如版本号 6,通信类别和流标签为 0 等;第二类是一些冗余的信息,如有效载荷的长度与校验和等。

RFC4944 定义了一种可行的报头压缩方案。在最好的情况下,该方案可以把 40Bytes 的报头压缩到 2Bytes,HC1 字节指示 IPv6 报头中各字段的压缩方式,未压缩的内容按序放入未压缩的字段中^[6]。这种方案只能压缩本地链路的 IPv6 地址(前缀为 FE80);在使用全局 IPv6 地址的情况下,该方案的压缩效果并不能满足设计要求。RFC6282 是一个新的报头压缩标准,它采用了一种基于共享的上下文(context)信息表的压缩方案,能够很好地支持对本地链路地址以及全局地址的压缩^[8]。当通信双方是低功耗蓝牙的 Master 和 Slave 节点时,源端和目的端的 IPv6 本地链路地址都可以根据 48bit 的蓝牙设备地址生成,因此两个地址都可以消去,压缩后的报头长度为 2Bytes。当源端和目的端的地址中至少有一个是全局地址时,RFC6282 使用 4bits 的标识符指向上下文表中的一个全局地址。RFC6282 没有定义共享的上下文信息的建立方式。

针对低功耗蓝牙传感网星形拓扑的网络,把所有可能与传感网中任一节点通信的远端设备的全局 IPv6 地址都添加到边界路由节点的上下文信息表中,4bits 的标识符为其在表中的索引。同时,边界路由节点必须与低功耗蓝牙传感网内的传感节点共享远端设备的上下文信息。这种机制能把 IPv6 的报头压缩至 2Bytes(当远端设备的地址为本地链路地址)或 3Bytes(当远端设备的地址为全局地址),从而大大减轻了传感节点系统的负担。解压缩是压缩的逆过程,UDP 报头压缩参照了 RFC6282 中下一个头的压缩方案,不再赘述。

3.2 IPv6 模块

低功耗蓝牙传感节点自身的资源有限,因而必须采用轻量级的 IPv6 协议栈。本系统选择了 μ IPv6^[3],主要是因为 μ IPv6 具备以下优点:实现了 TCP/IPv6 协议栈最小的功能集,符合 RFC 文档规范;采用 C 语言编写,具有很好的可移植性;已被广泛的使用,有丰富的文档支持。整个 μ IPv6 协议栈既可作为单独的任务运行,也可作为一个过程调度在无操作系统的平台上运行。

在小的智能节点上,RAM 是最宝贵的资源。传统的 TCP/IP 实现通常采用分层实现、动态内存分配的机制,虽然整个协议栈的复杂性降低了,但是性能会受到较大影响。分层实现的机制需要为每一层分配足额的缓冲区,从而消耗掉

比较多的 RAM;数据的传递需要在不同层次间进行拷贝,给处理器和数据总线带来较重的负担。此外,频繁的内存动态分配与释放也会占用较多的系统资源。鉴于此, μ IP 使用单一的全局数据包缓冲区 (uip_buf) 来存放接收和发送的数据包。网络设备驱动程序和应用层的数据都直接被放入全局缓冲区,协议栈会对全局缓冲区中的数据进行逐层次的处理。为了避免缓冲区内的数据被新数据覆盖,数据进入缓冲区后,会被尽快处理;当缓冲区内数据正在被处理时,新数据会在驱动层或应用层排队等候进入缓冲区。缓冲区的大小可以进行配置,全局缓冲区应当能够包含应用需要的数据包的最大尺寸。

基于 μ IPv6 的低功耗蓝牙协议栈对数据的封装与解封装过程如图 4 所示。

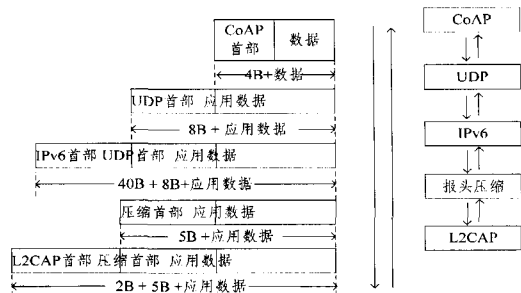


图 4 数据封装与解封装

在接收数据时,L2CAP 层收到数据并解压缩,生成一个完整的 IPv6 数据包。在处理 ICMPv6 数据包时,参照 6LoWPAN 中 RS/RA (Router Solicitation/Router Advertisements) 数据包和 6CO (6LoWPAN Context Option) 的定义,设计了上下文信息的处理和交换方案。若下一层协议是传输层协议,则进行端口号和校验码的验证。一切验证无误后,一个应用层事件 (μ IP 采用基于事件驱动的应用程序接口) 被触发,并且 UIP_APPCALL 接口 (在网络的初始化中需要给 UIP_APPCALL 指定一个应用层处理函数的入口) 被调用。在处理应用层数据时, μ IP 会验证协议版本号,比较源端和目的端的地址是否正确,验证校验码,然后直接进入下一层协议进行处理。若下一层协议是 ICMPv6, μ IP 则根据控制消息类型按照 ICMPv6 协议进行处理。

应用层事件包括监听端口、连接建立、收到数据、发送数据等,不同的事件可以调用不同的处理函数进行处理。在系统设计中,当收到数据的事件被触发时,CoAP 层的接口函数会被调用。

应用层的数据在经过 μ IP 协议栈的处理和报头压缩以后,经由 L2CAP 层被发送。 μ IPv6 提供了 uip_periodic 函数,它与系统定时器相结合,被用来处理 μ IP 内部的周期性事件。同时,本系统设计根据传感节点的能力对全局缓冲区大小和支持的连接个数进行了配置。

3.3 CoAP 模块

CoAP 是一种面向 URI (统一资源标识符) 的应用架构,网络上的对象都被抽象为资源,每个资源对应一个 URI。可以通过客户端/服务器、请求/响应的方式来访问传感器数据,并通过 URI 来定位数据。CoAP 的设计考虑了传感节点的处理能力和电能消耗,非常适合在低功耗蓝牙传感节点上使用。

CoAP 的主要工作由事务层和请求/响应 (request/response) 层完成^[11]。事务层负责端点之间的消息处理。在

CoAP 的客户端和服务器端的通信中,消息类型有 4 种: Confirmable (CON),需要确认; Non-Confirmable (NON),可重复的消息,不需要确认; Acknowledgment (ACK),对 CON 消息进行确认的消息; Reset (RST),指示 CON 消息没有收到正确的确认消息。在系统设计中需要周期性地请求传感器数据,并不需要确认数据是否到达;因此, NON 消息类型就可以满足需求。请求/响应机制负责传输请求和响应数据包。CoAP 客户端发出请求,CoAP 服务器端会根据收到的请求进行处理,然后向 CoAP 客户端发送一个响应。CoAP 通过几种基本的方法 (如 GET、POST、DELETE、PUT) 来操作传感器数据。

CoAP 设计目标之一是减小传输消息的长度^[12],避免出现过长的数据包而导致分段处理。CoAP 使用 4Bytes 的定长报头,一个典型的 CoAP 请求报文的长度只有 10~20Bytes,大多情况下都可以通过低功耗蓝牙一次传输完成。在一次 CoAP 请求中,CoAP 客户端通过 URI 指定要访问的传感器数据,CoAP 服务器端解析 CoAP 请求,根据指定的传感器类别来采集数据,然后向 CoAP 客户端发送一个包含传感器数据的响应。

4 实验结果与分析

按照图 1 描述的系统拓扑结构,本文搭建了一个验证系统,并且通过实例验证了系统的重要性能指标,如端到端的时延、BLE 传感节点存储和能量的消耗等。

4.1 实例

本文完成了传感节点、边界路由节点和 Web 服务器的开发,并且实现了 CoAP 服务器 (即 BLE 传感节点) 与 CoAP 客户端之间端到端的 IPv6 连接。传感节点采用 TI 的 CC2540 芯片 (单模的 BLE 芯片),使用 CR2032 的纽扣电池 (3V, 230mAh) 供电。在低功耗传感节点上,运行着 TI 提供的 BLE 协议栈、定制的轻量级 IPv6 协议栈和 CoAP 服务器程序。边界路由节点是 Nokia N9 智能手机,其使用的 TI WL1273 芯片集成了双模蓝牙和 Wi-Fi,能够同时连接基于 BLE 的无线传感网和因特网。Web 服务器运行着 CoAP 客户端程序,并且可以通过因特网直接访问。在本节实验中,用户的 CoAP 请求通过 CoAP 客户端程序从 Web 服务器发出;边界路由节点把收到的 IPv6 数据包转发到 BLE 传感网内部的 BLE 传感节点;CoAP 服务器对 CoAP 请求进行处理,并最终将请求的传感器数据传输给 Web 服务器。

4.2 系统延迟

数据访问的时间延迟是评价本体系结构的一项重要参数。本节的测试把 CoAP 客户端发出 CoAP 请求与收到响应之间的时间定义为系统延迟。系统延迟主要由 BLE 传感节点间的延迟 (BLE 延迟) 和边界路由节点与 Web 服务器之间的传输延迟 (网络延迟) 两部分组成。

边界节点与 Web 服务器之间的数据传输延迟由边界路由节点接入的无线网络 (Wi-Fi、2G、3G 等) 的性能决定。如果边界路由节点所接入的网络环境比较稳定,则网络延迟不会有显著的变化。根据低功耗蓝牙的特性,BLE 延迟与连接间隔 (Connection Interval) 相关。BLE 传感节点与边界路由节点建立连接时,两者必须协商一个连接间隔。BLE 设备将根据连接间隔所定义的时间,周期性地从休眠状态唤醒收发数据。蓝牙 4.0 规范规定了连接间隔的取值范围,最短为

7.5ms,最长为 4s。大多数情况下,BLE 设备间的传输延迟在 1~2个连接间隔之间。

测量中,设置了一组典型的连接间隔时间,在每一个连接间隔下,重复进行多次数据请求,在 Web 服务上记录系统延迟的时间,在边界节点上记录 BLE 延迟。然后,用系统延迟减去 BLE 延迟得到网络延迟的时间。实际的系统延迟测试结果如图 5 所示。

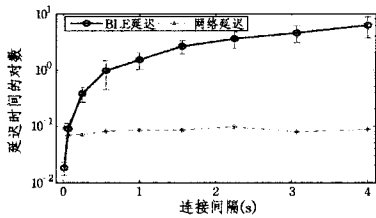


图 5 系统延迟(误差线表示 BLE 延迟的标准差)

在图 5 中,横坐标表示连接间隔的时间;纵坐标表示延迟时间(单位为秒)的对数坐标系。由图 5 可知,网络延迟的均值约为 100ms,其不随连接间隔的改变而显著变化。BLE 延迟随着连接间隔的增大呈线性增长。当 BLE 的连接间隔小于 60ms 时,网络延迟占系统延迟的主要部分;当连接间隔大于 60ms 时,BLE 延迟成为系统延迟的主要部分。

4.3 存储消耗

在低功耗蓝牙传感节点上,IPv6 协议栈和 CoAP 协议实现部分占据了新增空间的主要部分。此外,报头压缩所需的上下文信息的存储占用较少空间。完整的 μ IPV6 模块需要 2kB 左右的 RAM;BLE 传感网使用的是星形拓扑结构,节省了邻居发现、路由转发等功能所占用的存储和运行空间。表 1 给出了 BLE 传感节点上各个模块 ROM 和 RAM 空间的占用情况。

表 1 存储空间占用量

	ROM	RAM
报头压缩	3.6(kB)	312(B)
μ IPV6 模块	10.9(kB)	829(B)
CoAP 模块	4.2(kB)	210(B)

实验结果表明,经过改造的 μ IPV6 和 CoAP 协议栈可以在 8kB RAM 和 256kB ROM 的低功耗蓝牙芯片上运行。

4.4 能量消耗

本系统中,只有 BLE 传感节点使用小容量一次性的纽扣电池供电,因此本实验主要考察 BLE 传感节点在加入 IPv6 协议栈后的电能消耗情况。

在建立 BLE 连接后,芯片在连接间隔的大部分时间处于休眠模式,并被周期性地唤醒。蓝牙 4.0 规范称这种周期性的唤醒为连接事件(Connection Event),一次连接事件持续的时间长度为唤醒时长,休眠模式的时间长度为休眠时长。BLE 传感节点工作时的平均功率可由两次连接间隔之间的功率表示;后者可由连接事件和休眠模式的功率计算得到。在恒定电压源的供电下,测量一次连接事件的瞬时电流大小和唤醒时长,以及休眠模式时的电流大小和休眠时长即可得二者的功率。由文献[9]知,当 CC2540 芯片运行在 PM3 模式时,休眠模式的电能消耗为 1uA,休眠时长可由连接间隔的长度减去唤醒时长得到。因此,为了估算节点的功耗,必须准确测量芯片被唤醒后各状态能量的消耗以及持续时间。

sBLE 芯片被唤醒后依次经历 MCU 唤醒(wake-up)、预

处理(pre-processing)、预接收(pre-Rx)、数据接收(Rx)、接收到发送转换(Rx-to-Tx)、数据发送(Tx)和后期处理(Post-processing)共 7 种状态,才能完成一次连接事件的处理。在采用恒定电压源供电的情况下,本实验使用示波器测量流经芯片的瞬时电流。图 6 描述了 CC2540 芯片在一次连接事件中,上述 7 个阶段的电流大小和持续时间。

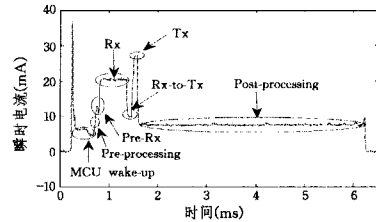


图 6 一次连接事件 CC2540 芯片的电流变化

在给定 BLE 为 1Mb/s 传输速率的前提下,接收和发送数据的长度决定了 Rx、Tx 状态持续的时间;Post-processing 状态用于处理接收到的数据。

经实际的测量结果分析可知,在不同的连接间隔下,唤醒时长不同;当连接间隔增大时,唤醒时长随之增大。在相同的连接间隔时间下,根据 pre-Rx 状态持续时间的不同,唤醒时长会出现两个值。由文献[9]统计发现,长唤醒时间出现的比例为 73%,短唤醒时间出现的比例为 27%,为了更精确地估算电能消耗,本实验同时考虑了这两种情况,在不同的连接间隔下通过示波器多次测量有数据和无数据传输时的唤醒时长。图 7 给出了在典型的连接间隔下,一次连接事件处理一次 CoAP 请求和无数据传输,唤醒状态持续的时间长度的平均值。

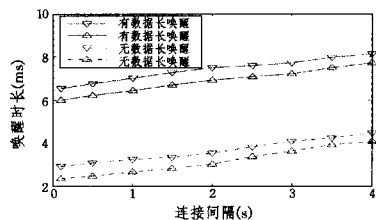


图 7 不同连接间隔下唤醒时长

一次连接事件消耗的总能量等于各状态消耗的能量之和。通过示波器抓取一次连接事件的瞬时电流和各状态持续的时间长度,用 Matlab 积分方法可计算出一次连接事情的功耗。在典型的连接间隔下经过多次的测量,计算可得典型的连接间隔下连接事件(有/无数据传输)的平均功耗,唤醒时长由长唤醒时长和短唤醒时长按比例计算得到,结果如表 2 所列。

表 2 一次连接事件的平均功耗

连接间隔 (s)	一次连接事件的平均功耗			
	有数据传输		无数据传输	
	功耗	唤醒时长	功耗	唤醒时长
0.1	166.4(μ J)	6.38(ms)	72.3(μ J)	2.75(ms)
0.5	173.9(μ J)	6.59(ms)	81.9(μ J)	2.90(ms)
1.0	194.5(μ J)	6.86(ms)	100.8(μ J)	3.07(ms)
1.5	196.1(μ J)	7.11(ms)	100.4(μ J)	3.19(ms)
2.0	213.8(μ J)	7.33(ms)	114.0(μ J)	3.39(ms)
2.5	225.3(μ J)	7.46(ms)	126.6(μ J)	3.68(ms)
3.0	236.2(μ J)	7.57(ms)	136.5(μ J)	3.93(ms)
3.5	240.1(μ J)	7.83(ms)	150.7(μ J)	4.15(ms)
4.0	249.7(μ J)	8.01(ms)	158.5(μ J)	4.36(ms)

当有数据传输时, BLE 芯片需要更长的时间用于数据处理, 耗能更多。由表 2 可知, 一方面, 随着连接间隔的增长, 唤醒时长也随之增大, 一次连接事件消耗了更多的能量; 另一方面, 连接间隔越大, 芯片处于休眠模式总时间的比例越大。综合以上因素可知, 一定电量电池的寿命与连接间隔的大小相关。得到一次连接事件的唤醒时长和功耗, 可以估计出 BLE 芯片的平均功率。假设一块纽扣电池的电量为 230mAh, 根据平均功率可计算出典型连接间隔下纽扣电池的寿命, 如图 8 所示。

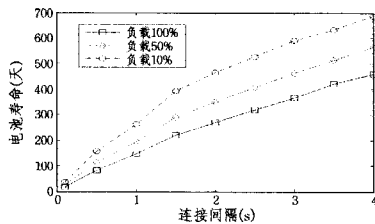


图 8 不同连接间隔和负载下 230mAh 电池可用天数

在图 8 中, 负载表示有数据传输连接事件所占的比例(如当连接间隔为 100ms 时, 每秒传输一次数据的负载为 10%)。一块纽扣电池的使用时间, 随连接间隔的增大呈线性增长。在满足需求的情况下, 如果要降低平均功耗, 可以采用增大连接间隔或降低负载的方法。由图 8 的结论知道, 基于本文描述的体系结构, 一块纽扣电池可以持续工作数月至数年之久, 满足大多数应用场景对低能耗的需求。

结束语 本文设计和实现了一种基于低功耗蓝牙技术的端到端 IPv6 的物联网体系结构, 避免了基于代理方式互联异构网络的不足, 提高了异构网络的互操作性、数据传输的透明性和协议栈的通用性。基于 RESTful 的 CoAP 应用层协议提供了一种类似于 HTTP 的资源获取方式, 具有良好的扩展性。实验结果表明, 整个体系结构可以在资源受限的低功耗蓝牙节点上运行, 其对存储空间和处理器资源的消耗不会超过节点的硬件限制。实际测量的能耗数据表明, 系统的能耗极低, 可以满足对能耗敏感的物联网应用系统的需求。

本文提出的新型物联网体系结构, 在不显著增加系统的负担的情况下, 实现了低功耗蓝牙传感网与因特网之间的端

到端 IPv6 通信, 并且提供了一种友好的传感数据获取方式。

参 考 文 献

- [1] Sig B. Bluetooth Specification version 4.0[S]. June 2010
- [2] Dunkels A, Voigt T, Alonso J. Making TCP/IP Viable for Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of the First European Workshop on Wireless Sensor Networks(EWSN 2004). Work-in-progress session, Berlin, Germany, Jan. 2004
- [3] Vasseur J-P, Dunkels A. Interconnecting Smart Objects with IP the Next Internet[M]. Morgan Kaufmann, 2010
- [4] Rodrigues Joel J P C, Neves Paulo A C S, et al. A survey on IP-based wireless sensor network solutions[J]. Int. J. Commun. Syst., 2010, 8:963-981
- [5] Nieminen J, et al. Transmission of IPv6 Packets over Bluetooth Low Energy[M]. Internet-Draft, 6LoWPAN Working Group (6lowpan), March 2012
- [6] RFC4944. Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks[OL]. <http://tools.ietf.org/html/rfc4944>
- [7] Hui J W, Culler D E. IP is Dead, Long Live IP for Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of the 6th ACM International Conference on Embedded Networked Sensor System, SenSys'08. ACM, New York, 2008
- [8] RFC6282. Compression Format for IPv6 Datagrams over IEEE 802.15.4-Based Networks[OL]. <http://datatracker.ietf.org/doc/rfc6282/>
- [9] Kamath S. Measuring Bluetooth® Low Energy Power Consumption. Texas Instruments [OL]. <http://www.ti.com/lit/an/swra347a/swra347a.pdf>
- [10] Selvig B. Measuring power consumption with CC2430 & Z-Stack. Texas Instruments [OL]. <http://www.ti.com/lit/an/swra144/swra144.pdf>, 2007-07-08
- [11] Colitti W, Steenhaut K, De Caro N. Integrating Wireless Sensor Networks with the Web[C]//Proc. IP+SN. Chicago, IL, USA, 2011
- [12] Kovatsch M, Duquennoy S, Dunkels A. A Low-Power CoAP for Contiki[C]//Proc of the Workshop on Internet of Things Technology and Architectures(IEEE IoTech 2011). Spain, Oct. 2011

(上接第 73 页)

构没有发生明显变化, 表明其具有更高的抗故障能力。

参 考 文 献

- [1] 杨海波, 陈国友, 王智学, 等. 网络中心化决策优势建模及分析[J]. 指挥控制与仿真, 2010, 32(1):26-29
- [2] Daniel G, Enrique G A, Conrado M, et al. Centrality and power in social network; A game theoretic approach [J]. Mathematical Social Sciences, 2003, 46(1):27-54
- [3] 张翼, 刘玉华, 许凯华, 等. 一种基于互信息的复杂网络节点重要性评估方法[J]. 计算机科学, 2011, 38(6)
- [4] Freeman L C, Borgatti S P, White D R. Centrality in valued graphs; A measure of betweenness based on network flow [J]. Social networks, 1991, 13(2):141-154
- [5] 仲里, 拜丽萍, 郝政疆, 等. 构建网络中心化的军事电子信息系统[J]. 国防技术基础, 2009(07)
- [6] 郑梅容, 刘玉华, 许凯华, 等. 基于耦合系数的无标度网络建模[J]. 计算机科学, 2012, 39(5):66-68, 82
- [7] 陶少华, 刘玉华, 许凯华, 等. 基于容量维度的复杂网络自相似性研究[J]. 计算机工程, 2008, 34(2):175-177
- [8] Xu Kai-hua, Meng Yong-wei, Liu Yu-hua, et al. An Effective Method to Improve the Resistance to Frangibility in Scale-free Networks[C]//The 13th IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE-2010). IEEE Computer Society, Hongkong, China, December 2010:11-13
- [9] 张婧婧, 李全胜, 达新民. 一种评定复杂网络的中心化程度的新方法[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2006, 3(1):13-20