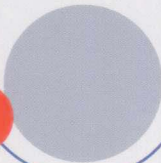


低功耗

蓝牙技术原理与应用

陈灿峰 编著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

013067087

TN929.5
319

内容简介

低功耗蓝牙技术原理与应用

陈灿峰 编著



北京航空航天大学出版社



北航

C1674783

TN929.5
319

内 容 简 介

本书系统介绍了低功耗蓝牙技术的技术特点、各层相关协议规范以及目前主流的低功耗蓝牙芯片、模块和开发工具等内容,并详细阐述了面向主流智能手机操作系统(iOS、Android、Meego等)的低功耗蓝牙应用开发实例,从而帮助读者快速掌握低功耗蓝牙技术。

本书可作为无线电爱好者和工程技术人员学习低功耗蓝牙技术的参考读物,也可作为高等院校计算机、电子、嵌入式、物联网等相关专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

低功耗蓝牙技术原理与应用 / 陈灿峰编著. --北京
:北京航空航天大学出版社,2013.9
ISBN 978-7-5124-1246-0

I. ①低… II. ①陈… III. ①短距离—无线电通信—
移动通信—通信技术 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 207845 号

版权所有,侵权必究。

低功耗蓝牙技术原理与应用

陈灿峰 编著

责任编辑 陈旭

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编:100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:emsbook@gmail.com 邮购电话:(010)82316936

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1 000 1/16 印张:14.75 字数:314 千字

2013 年 9 月第 1 版 2013 年 9 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5124-1246-0 定价:36.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

前 言

随着无线通信技术、传感器技术和嵌入式计算技术的高速发展和移动互联网时代的悄然来临,以智能家居和移动医疗为代表的各类智能无线传感器与物联网应用系统也逐渐涌现在消费者面前。与消费者密切相关的,除了已经广为使用的智能手机、平板电脑、家用电器、汽车电子设备以外,还包括各类具备了感知、控制、计算与联网能力的大机器与小物件的升级版。

低功耗蓝牙技术的前身实际上最早由诺基亚的工程师于2001年提出,经过近10年的标准化和产业化过程,2010年由蓝牙标准化组织(BT-SIG)在最新发布的蓝牙4.0版本的标准中引入了低功耗蓝牙技术,它是一种主要面向嵌入式低功耗的传感器类应用而设计的2.4GHz频段短距离无线通信的全球标准。低功耗蓝牙继承了传统蓝牙技术良好的互操作性特点,可确保不同厂商的低功耗蓝牙芯片与设备之间的兼容性;可以使用纽扣电池供电,可实现以往难以实现的嵌入式应用。在一颗传统蓝牙芯片的基础上增加低功耗蓝牙功能,几乎不增加硬件成本。与WiFi和传统蓝牙技术相比,它的连接速度更快、功耗更低;与ZigBee技术相比,它的协议栈更简单、抗干扰性能更好;与其他2.4GHz的私有无线通信技术相比,它与智能手机、平板电脑的互通性和通用性更好。低功耗蓝牙因其低功耗和低成本特性,已经被众多最新的智能手机、运动手表等移动设备所采用,也逐渐为各种运动健身、保健医疗等穿戴式传感器设备厂商所关注。

目前,国内一直缺少一本全面讲解低功耗蓝牙技术来源、标准规范及其在智能手机平台上进行低功耗蓝牙软件开发的书籍,于是本书应运而生。

本书较为系统地阐述了低功耗蓝牙的技术特点和各层相关协议规范,提供了面向主流智能手机操作系统的低功耗蓝牙应用开发实例,同时介绍了目前主流的低功耗蓝牙芯片、模块和开发工具等信息,从而帮助读者快速了解低功耗蓝牙技术,并为计划采用低功耗蓝牙技术进行实际应用系统开发的设计者提供了全面的技术参考。

全书共分7章,第1章介绍了低功耗蓝牙的基本概念和发展历程,并将各种短距离低功耗技术与低功耗蓝牙进行了对比;第2章讲述了低功耗蓝牙协议栈的体系结

构,并依次介绍了包括控制器、主机、主机控制器接口、蓝牙设备规范在内的各部件的具体功能和特性;第3章详细介绍了低功耗蓝牙的控制器规范,通过对物理层和链路层的介绍,清晰地描述了低功耗蓝牙的底层运作机制;第4章详细介绍了低功耗蓝牙的主机规范,描述了低功耗蓝牙如何通过属性协议和通用属性规范提供和获取服务;第5章介绍了低功耗蓝牙的应用规范,以心率服务和心率规范为例,列举了设备信息服务、心率服务和心率规范的具体内容,可供嵌入式软件工程师设计特定功能的属性规范时参考;第6章介绍了主流的低功耗蓝牙芯片规格和相应开发模块,可供硬件工程师设计电路板时参考;第7章针对主流的智能手机开发平台,包括 iOS、Android 和 Meego 等,分别介绍了心率规范、串口通信等功能的具体实现,提供了若干实际工程实例,可供软件工程师开发手机端应用时参考。

全书的组织和编写工作主要由刘嘉、赵登昌、王浩林、王剑锋、张鑫、郝闽军、陈灿峰等完成,陈灿峰完成了全书的统稿。感谢中国科学院计算机所徐勇军、中国科学院自动化刘禹、海军装备研究所王峰、北京航空航天大学牛建伟、何小庆、清华大学任丰源等老师提供的技术指导。感谢德州仪器公司的 Karl Torvmark、Desmond Chen、Yi Li, Nordic 公司的 Chim Chan、Geir Langeland, 博通公司的 Thomas Eichenberg 等长期的技术支持与热心帮助。本书的撰写工作也离不开低功耗蓝牙技术的发明人之一 Mauri Honkanen 对本书作者的鼓励,以及 Hannu Kauppinen 等诺基亚资深技术专家对本书作者的支持,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限加之时间仓促,书中的不当及错误之处,恳请读者和专家批评指正。

陈灿峰

2013年8月

目 录

第 1 章 低功耗蓝牙技术概述	1
1.1 蓝牙通信技术	1
1.1.1 传统蓝牙	2
1.1.2 低功耗蓝牙	3
1.2 低功耗蓝牙发展历程	4
1.3 短距离低功耗通信技术对比	8
1.3.1 ZigBee	8
1.3.2 射频识别(RFID)	12
1.3.3 近场通信(NFC)	12
1.3.4 红外数据传输(IrDA)	14
1.3.5 超宽带(UWB)	14
1.3.6 ANT	16
第 2 章 低功耗蓝牙的协议栈	19
2.1 蓝牙 4.0 核心系统	19
2.2 低功耗蓝牙协议栈	21
2.3 控制器	24
2.4 主机	25
2.5 主机控制器接口	26
2.6 蓝牙规范	28
2.6.1 通用访问规范	28
2.6.2 规范层次	29
2.6.3 通用属性规范	30
2.6.4 基于 GATT 的规范层次	30
第 3 章 低功耗蓝牙的控制器规范	32
3.1 物理层规范	32
3.1.1 频率范围及频道分配	32
3.1.2 发射机参数	32

目 录

3.1.3	接收机参数	34
3.2	链路层规范	36
3.2.1	概 述	36
3.2.2	空中接口报文	39
3.2.3	比特流处理	48
3.2.4	空中接口协议	50
3.2.5	链路层控制	66
第 4 章	低功耗蓝牙的主机规范	73
4.1	属性协议	73
4.1.1	协议概述	73
4.1.2	协议要求	74
4.2	通用属性规范	98
4.2.1	规范概述	98
4.2.2	服务的互操作要求	104
4.2.3	GATT 定义的功能	113
4.2.4	L2CAP 互操作要求	130
4.2.5	GAP 互操作要求	131
4.2.6	定义的通用属性规范服务	131
第 5 章	低功耗蓝牙的应用规范	133
5.1	设备信息服务	133
5.2	心率服务	136
5.2.1	服务声明	137
5.2.2	服务特性	137
5.3	心率规范	139
5.3.1	配 置	140
5.3.2	心率传感器角色的需求	140
5.3.3	采集器角色的需求	141
5.3.4	连接建立过程	143
5.3.5	安全因素	146
第 6 章	低功耗蓝牙芯片与模块	147
6.1	CC2540/41	147
6.1.1	概 述	147
6.1.2	功能模块	149
6.1.3	硬件设计	153
6.2	BLE112 模块	156
6.2.1	概 述	156

6.2.2	硬件设计	157
6.2.3	软件设计	160
第7章	低功耗蓝牙的应用开发实例	164
7.1	TI 低功耗蓝牙协议栈及心率规范开发实例	164
7.1.1	概 述	164
7.1.2	设备信息规范和心率规范的具体实现	165
7.1.3	Keyfob 上工程分析	168
7.1.4	USB Dongle 上工程(HostTestRelease. eww)分析	168
7.1.5	BTool	169
7.1.6	运行流程	169
7.2	iPhone4S 手机与低功耗蓝牙节点通信开发实例	177
7.2.1	Core Bluetooth 框架	177
7.2.2	SerialGATT 类	178
7.2.3	CC2540 工程	187
7.2.4	Arduino 配置和代码	193
7.2.5	iOS 示例程序	195
7.2.6	串口通信示例程序的应用说明	202
7.3	Android 手机与低功耗蓝牙节点通信的 API	204
7.3.1	SDK	204
7.3.2	可用性	205
7.3.3	API 概述	205
7.3.4	不同类之间的交互和层次关系	206
7.3.5	Android Manifest 元素	207
7.3.6	蓝牙的启用和设置	207
7.3.7	GATT 客户端角色	207
7.3.8	GATT 服务器端角色	211
7.3.9	关键类的描述	213
7.4	Meego 手机与低功耗蓝牙节点通信开发实例	220
7.4.1	概 述	221
7.4.2	设备信息规范和心率规范的具体实现	222
7.4.3	Nokia N9 上软件 gatttool 介绍	222
7.4.4	运行的具体流程	222
参考文献	227

第 1 章

低功耗蓝牙技术概述

低功耗蓝牙是蓝牙技术的最新版本(也称蓝牙 4.0),是一项专门面向传感器类应用的低数据量、突发性通信需求定制的低功耗、短距离通信技术。本章回顾了低功耗蓝牙技术的发展历程、标准化过程和技术特点,并将其与其他短距离低功耗无线通信技术进行了对比。

1.1 蓝牙通信技术

一直以来,人们渴望便捷地连接各类移动设备、嵌入式设备、计算机外设和家用电器,实现自由的信息传输与分享。短距离无线通信技术的出现实现了人们的愿望,在过去十余年间经历了快速的发展和更新过程,在成本、功耗、实用性和可靠性等方面逐步趋于成熟,并在社会生产和人们生活等诸多方面发挥了重要作用。

在众多短距离通信技术当中,蓝牙是应用最为广泛、最为普及的技术之一。蓝牙最早由爱立信公司于 1994 年始创,目标是使各种设备在没有电缆连接的情况下能够在近距离范围内实现相互通信或操作。1998 年爱立信联合英特尔、诺基亚、IBM 和东芝等公司创立了蓝牙技术联盟(Bluetooth SIG),之后制定了第 1 版和第 2 版技术规范,即基本速率(BR)和增强数据速率(EDR);2009 年和 2010 年蓝牙技术联盟还分别发布了 Bluetooth 技术规范的第 3 版和第 4 版,引入了高速(HS)和低功耗(LE)蓝牙技术规范,进一步拓展了 Bluetooth 的应用场景。蓝牙技术联盟为非盈利行业协会,本身不从事蓝牙产品的制造、生成或销售,而主要负责蓝牙标准的制定、实施和推广工作。时至今日,蓝牙技术联盟已有成员超过 15 000 个,蓝牙产品已在通信、计算机、医疗、汽车、工控等多个行业中获得了广泛应用。

目前,蓝牙已累计颁布了 6 个版本:V1.1/1.2/2.0/2.1/3.0/4.0,其标准规格不断得到更新和加强。早期的蓝牙版本(如 1.1 版以及加入跳频(frequency hopping)功能的 1.2 版本)设计带宽 748~810 kbps,支持音频流传输但仅为单工方式。2004 年颁布的蓝牙 2.0 版本提升了传输速率,带宽为 1.8~2.1 Mbps,且能够支持双工工作方式,即可以同时传输音频流和数据文件;基于该版本,2.1 版本针对蓝牙设备的配对流程进行了简化,同时加入减速呼吸(sniff subrating)模式,大幅降低了蓝牙芯片的工作负载,增强了节能效果。2009 年 4 月,3.0 版本高速蓝牙标准颁布,引入一种称为替代射频(AMP, Alternate MAC/PHY)的新型射频技术。AMP 允许蓝牙协

议栈通过 802.11 PAL(协议适应层)直接操作 IEEE 802.11 链路层和物理层,从而实现最高 24 Mbps 的数据传输速率。高速蓝牙大幅提升了传输带宽,并且兼容已有的蓝牙应用,使程序可以在高速蓝牙和传统蓝牙之间实现切换。高速蓝牙是一个不够成功的蓝牙规范,支持蓝牙 3.0 的设备也不多。

2010年6月,蓝牙技术联盟发布了最新的蓝牙核心规范 4.0 版。该规范实质上由 3 部分组成——传统蓝牙(包括 BR/EDR)、高速蓝牙(HS)以及新的低功耗蓝牙(LE)技术,三者合而为一,统一在蓝牙框架之下。其中,低功耗蓝牙规范定义了全新的物理层和链路层,但重用了传统蓝牙协议栈中的许多模块,从而简化了协议栈的实现。

1.1.1 传统蓝牙

传统蓝牙的技术规范包括 Core(核心协议)与 Profile(规范,也称为配置文件)两个部分。Core 部分定义了蓝牙的各层通信协议,Profile 指出了如何利用各层协议实现具体的应用。传统蓝牙的协议栈如图 1-1 所示。

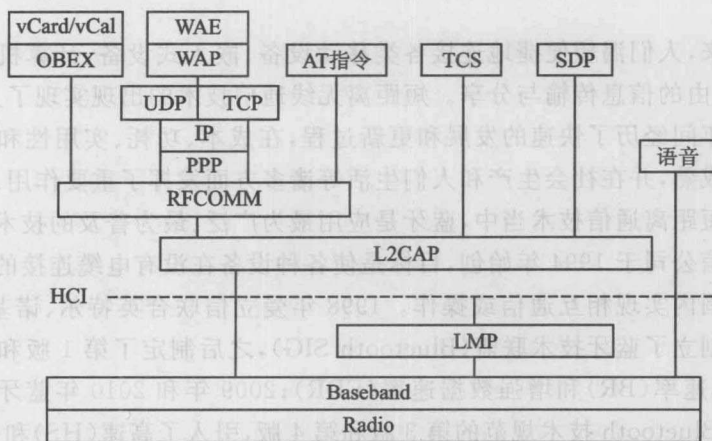


图 1-1 传统蓝牙的协议栈

传统蓝牙的射频(Radio)、基带(Baseband)与链路管理协议(LMP)用于语音与数据无线传输的物理实现以及蓝牙设备的物理、逻辑链路的建立,逻辑链路控制与适配协议(L2CAP)和主机控制器接口(HCI)用于逻辑链路控制的物理实现以及蓝牙设备间的连接与组网。串口仿真协议(RFCOMM)用于模拟串行接口环境,使得基于串口的传统应用无须修改(或仅作少量的修改)便可以直接在该层上运行。服务发现协议(SDP)实现了蓝牙设备之间相互查询及访问对方提供的服务。对象交换协议(OBEX)使得如电子名片(vCard)和电子日历(vCal)等对象的交换应用可以运行在蓝牙协议栈之上。网络访问协议(包括 PPP、IP、UDP、TCP 等)用于实现蓝牙设备的拨号上网,或通过网络接入点访问 Internet 和 WAP。电话控制协议包括电话控制协议规范(TCS)、AT 指令集和语音,使得蓝牙直接在基带上处理音频信号(主要指数

字语音信号),采用 SCO 链路传输语音,可以实现头戴式耳机和无绳电话等应用。

传统蓝牙设备的最大发射功率可分为 3 个等级:Class 1 为 100 mW (20 dBm), Class 2 为 2.5 mW (4 dBm), Class 3 为 1 mW (0 dBm)。发射功率为 1 mW (即 0 dBm)时的覆盖范围为 10 m,适合于短距设备(如鼠标、键盘、耳机等);发射功率为 100 mW (20 dBm)时,覆盖范围可达到 100 m,适合于设备需要经常变动的场合(如无绳电话、访问接入点、笔记本电脑等)。

传统蓝牙的物理层采用归一化带宽 $BT=0.5$ 的 GFSK(高斯频移键控)调制技术,调制指数为 0.35,其中基本速率(BR)的基带符号速率为 1 Mbps,增强数据速率(EDR)的基带符号速率为 2 Mbps($\pi/4$ -DPSK)或 3 Mbps(8DPSK);传统蓝牙把信道分成若干个长为 $625 \mu\text{s}$ 的时隙,每个时隙交替进行发射和接收,实现时分双工(TDD)。传统蓝牙采用电路交换和分组交换技术,可支持异步数据信道和同步语音信道。每个同步语音信道的数据速率为 64 kbps,对称和非对称异步数据信道的数据速率可达 433.9 kbps 和 723.2 kbps(下行)/57.6 kbps(上行)。

1.1.2 低功耗蓝牙

低功耗蓝牙(Bluetooth Low Energy, BLE)是一种新型的超低功耗无线传输技术,主要针对低成本、低复杂度的无线体域网和无线个域网设计,最主要的卖点之一就是可以用纽扣电池为低功耗蓝牙芯片供电,结合微型传感器构建出各种嵌入式或者可穿戴式传感器与传感器网络应用。低功耗蓝牙的出现并非偶然。早在 2004 年,诺基亚就推出了蓝牙低端扩展(Bluetooth Low End Extension, LEE)技术,成为低功耗蓝牙技术的前身。随后为推进行业应用,围绕该技术成立了 Wibree 技术联盟。2007 年,蓝牙技术联盟宣布将 Wibree 技术纳入蓝牙技术的大旗,致力于创造超低功耗的蓝牙无线传输技术。低功耗蓝牙最终成为 2010 年发布的蓝牙核心规范 4.0 版本的一个重要组成部分。为了更好地区分单模与双模蓝牙设备,蓝牙技术联盟还发布了 Bluetooth Smart 商标,用于标识支持单模低功耗蓝牙技术的各类传感器和附件,而同时支持传统蓝牙与低功耗蓝牙的双模芯片,则被印上了 Bluetooth Smart Ready 商标。

为了提高软硬件设计时的重用率,低功耗蓝牙在协议设计时尽可能继承了传统蓝牙的组件,但对协议栈进行了简化设计。此外,低功耗蓝牙还在物理层和链路层引入了若干重要变化。首先,两种蓝牙都工作在 2.4 GHz ISM 频段,但低功耗蓝牙将频段重新划分为带宽为 2 MHz 的 40 个信道(传统蓝牙为 79 个信道),其中 3 个为广播信道,其余为数据信道。广播信道的引入加快了设备查找和接入操作,主设备(master)和从设备(slave)在广播信道上分别执行“发起”(initiating)和“广播”(advertising)便能够实现快速连接(传统蓝牙须在所有信道上跳频执行 inquiry 或 page 操作),连接后也无须执行强制的角色转换,低功耗蓝牙得以在最快 3 ms 内完成连接,而传统蓝牙的连接建立过程通常需要数秒。其次,低功耗蓝牙虽然继承了传统蓝

第1章 低功耗蓝牙技术概述

牙的跳频机制,但其在每个信道停留的时间更长,对定时器要求相对宽松,因此可以采用成本更低廉的元器件。再次,两类蓝牙技术均支持星型拓扑,但是传统蓝牙最多允许一个主设备连接7个从设备,而低功耗蓝牙没有该限制,理论上支持无限个从设备进行连接。此外,低功耗蓝牙的状态机更为精简,只有 standby、advertising、initiating、scanning、connection 共5种状态,一方面简化了协议栈设计,提升了效率,另一方面设备在进入 connection 状态后即刻进入周期性睡眠模式,而非传统蓝牙需进入 Park 状态才执行休眠,从而大大降低了功耗。

与 ZigBee 等低功耗无线技术相比,低功耗蓝牙具有价格低廉、连接快速、抗干扰性强等优点。低功耗蓝牙的物理层采用归一化带宽 $BT=0.5$ 的 GFSK(高斯频移键控)调制技术,调制指数为 0.5。最大发射功率 $0\sim 4$ dBm,室内传输距离可达 $10\sim 50$ m,降低的发射电流和峰值功率使相关设备仅凭纽扣电池供电即可工作;另外,与其他低功耗技术相比,由于低功耗蓝牙的频带更宽,数据发送速率更快(物理层数据速率为 1 Mbps),分组长度更短(物理层最大分组长度 41 字节,仅需 $328\ \mu\text{s}$ 即可发送完成),因此低功耗蓝牙更加适用于突发性强、数据包长度短的传感器类应用。在不发送数据时,低功耗蓝牙设备可以进入极低功耗的待机状态,待机电流降至 μA 级别,因此即使使用纽扣电池供电,设备的使用寿命也可以达到数月甚至数年。

低功耗蓝牙进一步延伸了传统蓝牙的功能和适用范围,除了为传感器、手表等现有设备拓展广阔的市场,还能用于各种可穿戴设备或家用电器与手机相连接,创造全新应用,例如在居家环境中让手机或平板电脑连接并控制电视、空调、温度计、体重计等不同电器、医疗与健身设备。目前,蓝牙技术联盟正在积极宣传和推进低功耗蓝牙技术,并将重点首先放在了医疗保健和运动健身领域。随着蓝牙 4.0 版本的体温计、心率计、血压计、听诊器、运动手表等产品的相继问世,低功耗蓝牙已在医疗和健身领域开启了无线感知与监测设备的新纪元。

1.2 低功耗蓝牙发展历程

1. 意识到机会

大约在 2001 年,诺基亚意识到在未来的各类新型应用中,手机将扮演一个重要的角色,为耳机、照相机、摄像机、手提电脑、RFID 装置等众多配件和设备提供连通性。同时,将有许多分布式传感器出现在人们的生活中,用于收集现实世界的信息,并作为新型服务的基础数据。但是,为了实现这一愿景,这些传感器需要通过某种形式的连接发送数据。当时这些设备无法与互联网服务通信——由于尺寸、功耗、成本等原因,它们不具备这样的通信能力。因此,移动电话可以作为所有其他传感器设备的网关。这一场景在过去的十余年间实际上已经逐步成为现实。但在当时,诺基亚就已经意识到标准的蓝牙技术无法满足这类应用在节能方面的高要求,或者通信能力方面的苛刻限制。虽然蓝牙耳机能够支持数小时的通话,但在小型电池供电、仅有

少量数据传输的设备上能耗依然太高,例如现实世界的各类传感器,如个人健康监测器、手表、心跳监测器,计算机外设、有源标签等。

在当时,无论是经典的蓝牙技术或其他短距离无线通信技术(如端到端 WLAN、红外线网络、RFID 等)都不能够满足这些能耗制约。诺基亚决定设计一种新的低功率、低成本、短距离、支持端到端通信的无线电技术,为连接数量处于不断增长中的小型装置和移动电话提供各种服务。然而,由于手机的内部空间极其有限,在已经包括若干无线网络的情况下增加新的芯片并非最好的选择。另一方面,由于诺基亚在 2004 年底退出了运动和健身装置相关市场,为降低最终产品的成本,诺基亚决定将该技术构建在现有标准上。

诺基亚研发团队认为,在未来蓝牙有可能在移动设备中被广泛采用,其将出现在数以亿计的各类消费电子产品当中,因此,尝试将一种新的适用于传感器的低功耗无线电添加到现有的蓝牙芯片上并开发原型系统,换言之,要为蓝牙扩展低功耗通信功能。

设计人员意识到,要在各项性能上超越其他现有技术并不现实,他们不得不慎重考虑新技术的定位,即开发一种在一定的配置约束下最适合使用的技术。由于标准蓝牙技术的一些功能几乎不可能在低功耗的情况下使用,他们开始重新审视蓝牙规范;当然,同时也在研究其他的无线技术。

2. 标准化尝试

2001 年春,IEEE 发出邀请,征集低功率无线电技术提案。IEEE 标准主要关注 1 层和 2 层协议栈,不过为了使整个系统运转,3 层有时也是必需考虑的一部分。Phillips 和 EATON 公司向 IEEE 提交并公开发布了它们的 ZigBee 技术(ZigBee 更多用于固定装置且相对静止的应用,且构建在网状网架构上,要求所有节点不断进行数据中断),并在随后加入第 3 层规范。诺基亚也决定提交其低功耗技术。Antti Lappetelainen 和 Mauri Honkanen 认识到这是一个将诺基亚在研低功耗技术进行标准化的绝好机会,于是迅速地完成了草案并提交给 IEEE。如果成功,这将使许多技术供应商采用该技术,开发具有竞争力的产品。同时,诺基亚加入了该标准化工作组,试图把标准化工作往前推进。然而,他们没有认识到,有两方面的问题成为了难以逾越的主要障碍。

首先,标准工作组中的大部分公司来自美国,而蓝牙技术源自欧洲;IEEE 原本就不接纳蓝牙技术,因为几年前他们被迫接受了一份不能开发与蓝牙竞争的技术的有关协议。显然,IEEE 不希望重蹈覆辙。其次,IEEE 已经支持一些公司(包括飞利浦半导体)组建开放联盟,制定无线传感器的竞争技术 ZigBee。(ZigBee 技术是一种基于 IEEE 802.15.4 标准的低数据率、低功率的无线电技术,主要用于无线个域网(WPAN)。)ZigBee 联盟当时刚刚兴起,但实际上已经有一个相当不错且相对成熟的标准化提案,该联盟的许多公司已经从一开始就在合作开发这项技术。

相对而言,诺基亚的低功耗技术基于蓝牙并不受 IEEE 青睐,于是指出诺基亚的低功耗无线电仅作为一个独立的提案,缺乏跨公司的合作。IEEE 标准化工作组

第1章 低功耗蓝牙技术概述

执行一个向下选择的过程——在连续的会议上,工作组不断删除提案。诺基亚的提案在很长一段时间内一直得以保留,但最终还是被取消,失去了被 IEEE 采用作为低功耗技术标准的可能性。

3. 早期发展

诺基亚通过改变标准蓝牙技术规范的以下几个方面,实现了低功耗特性:设备发现、跳频、双模和单模。到 2004 年中期,诺基亚完成了项目开发并实现了演示系统,称为蓝牙低端扩展(bluetooth low end extension)。然而,当时诺基亚没有发现适合的机会进行技术转让和应用。

2004 年年底,由于无法对业务前景做出任何实质性承诺,蓝牙低端扩展的研发工作似乎已告一段落。加之在 IEEE 标准化的努力遭到失败,诺基亚准备放弃所有的低功耗蓝牙服务的开发。就在此时,来自 Nokia Venture 的 Pasi Kempainen 在一次偶然的机会有了解到诺基亚研究院的这个项目。他对低功耗蓝牙技术表示了强烈兴趣,认为有商业化的可行性,计划把它推向市场。随后, Pasi 花了约半年时间向下游厂商介绍该技术,并最终获得了包括 Polar、Epson、Nordic Semiconductor 和 Logitech 在内的一线厂商的重视。诺基亚和这些公司进行了深入的技术讨论,在相互合作中,独立芯片的参考设计日益成熟。到 2005 年,所有的芯片原型设计工作基本完成,相关生态系统的搭建计划呼之欲出。

4. Wibree 联盟

起初, Pasi 构想由诺基亚创建一个联盟论坛,推进技术的发展并创建蓝牙低端扩展的生态系统。诺基亚打算向论坛成员授权技术的使用权,盈利模式为收取授权费用。因此,游说主流的半导体芯片厂商 TI(德州仪器)、Cambridge Silicon Radio(CSR)和 Broadcom(博通)等同意实现该技术变得至关重要。然而,这些芯片制造商不想加入另一个由诺基亚主导的专有论坛,声称设计一种新的蓝牙芯片难以快速创造价值,建议设计成传统蓝牙的一部分,同时希望该技术与蓝牙的整合越简单越好。诺基亚在单模芯片上的一些节能设计方案在双模芯片厂商的设计中被要求进行修改。经过评估,修改增加了约 10% 的能耗,但是并未影响数据发送时的峰值电流,并且在大多数情况下增加的能耗可以忽略。诺基亚及其合作伙伴最终妥协,接受了这些修改要求,与这些主流芯片厂商确定了单模和双模芯片的协议规范。

在获得了上下游厂商的支持后,蓝牙低端扩展已完成了产业链的覆盖,准备打造全新的生态系统。当时蓝牙技术联盟曾经讨论过是否将蓝牙低端扩展技术纳入蓝牙标准的一部分,得到的是一片反对之声。为此,诺基亚采取了一个冒险的策略,要看看蓝牙技术联盟对另一个直接竞争的基于 2.4 GHz 的低功耗生态系统的反应——要么竭力阻止该生态系统的成长,要么任其独自成长,要么将其合并。抱着最终被合并的想法,一个称为 Wibree 的专有技术论坛最终于 2006 年成立。到 2006 年年中,3 大蓝牙芯片供应商——TI、Broadcom 和 CSR(总共占 80% 的市场份额)加入了 Wi-

Wibree 技术联盟。其中, TI 同时宣布开始研制单模和双模芯片。

5. 并入 BT SIG

在 Wibree 论坛的公开声明中, 诺基亚并未直接表明加入蓝牙技术联盟的意图, 但提到愿意加入一个开放的、已成立的社区。这其实是一个强烈的暗示, 为其加入其他组织打开了一扇门。尽管没有进行实质性协商, 蓝牙技术联盟的反应却非常明确——不想 Wibree 成为另一个与之竞争的联盟。在 Wibree 论坛成立之时, 蓝牙技术联盟便着手准备实质性吸收 Wibree, 并开始讨论吸收 Wibree 的相关条款。

于是, 在整个 2007 年第一季度, 诺基亚的研究人员都在向蓝牙技术联盟的其他 6 家发起成员(爱立信、英特尔、联想、微软、摩托罗拉和东芝)证明蓝牙低端扩展/Wibree 在一些应用中性能表现十分卓越, 并且十分适合与蓝牙技术相结合。由于蓝牙技术联盟拥有众多会员企业, 包括诺基亚在内的 7 个创始公司的签署实际上能够代表所有的蓝牙会员。这一点十分重要, 因为如果诺基亚想在未来几年继续其在 Wibree 技术的主动权, 有可能面临蓝牙论坛其他成员的潜在的知识产权诉讼威胁。通过谈判, 诺基亚可以和蓝牙技术联盟内的所有成员达成协议, 消除这些潜在风险; 而一旦签署该协议, 在蓝牙技术联盟内的所有的公司均无权对 Wibree 技术提出专利索赔要求。

最终 BT - SIG 的 6 家发起成员同意吸收 Wibree, 实质的合并工作在 2007 年二季度进行, 2007 年 6 月 12 日, 两个行业论坛宣布正式合并。

在商业模型方面, 二者的谈判导致了新的商业模型: 并不按照每个芯片支付授权费用, 而是分享蓝牙认证收入的份额。由于每个产品如果想要获得蓝牙认证必须通过资格审查程序, 蓝牙技术联盟将从认证获得收入(每个产品认证费用从数百至数千美元不等), 再将其中的一部分交给包括诺基亚在内的原 Wibree 联盟成员。这部分补偿主要是针对 Wibree 论坛的创建和宣传工作, 而非技术和专利的补偿。

6. 产品化和技术推广

从 Wibree 并入蓝牙技术联盟的那一刻起, 相关规范也成为蓝牙标准的一部分。然而, 标准制定过程不会是简单和合并过程, 为了让数以千计的公司能够参与标准化制定, 蓝牙技术联盟成立了一个 ULP(Ultra Low Power)工作组, 负责撰写低功耗技术的具体规范。

新标准的制定从 2007 年 6 月开始, 在初始阶段, 为了避免整个过程中途夭折, 诺基亚的研究人员担任了主要的推动角色, 并且计划在 2008 年底前完成。然而, 由于众多公司和投资方的参与, Wibree 并入下一版本的蓝牙规范的过程变得相当复杂, 花了比预期更长的时间。直到 2010 年, 各方的意见最终达成一致, 蓝牙 4.0 规范制定工作结束。

在 2010 年初, 芯片厂商纷纷宣布双模或单模低功耗蓝牙芯片推向市场。TI 推出了单模低功耗蓝牙芯片 CC2540。CSR 推出了 BlueCore 7 多功能无线低功耗蓝牙产品和解决方案, 利用其模块化的 BlueCore 架构, 同时支持单、双模式低功耗器件。

第1章 低功耗蓝牙技术概述

Broadcom 表示其最新一代的蓝牙芯片——InConcert BCM2049 符合新的规范,并整合了蓝牙、FM 收音机和其他的音乐功能,特别适合媒体播放器和手机等音乐市场。2010 年 2 月, MindTree 发布通过验证的低功耗协议栈,供开发者在 TI 的 WiLink7.0 上设计工作(该芯片同时支持蓝牙、FM、WLAN 和 GPS 这 4 种无线技术)。

为推动新的低功耗生态系统的创新,蓝牙技术联盟从 2009 年开始举办蓝牙创新世界杯,探索未来的低功耗蓝牙技术的价值。2010 年 2 月在可穿戴技术展 IS-PO2010(世界上最大的体育用品贸易展会)上,蓝牙技术联盟从收到的超过 250 项创新应用中选出了 2009 年获奖者:由 Physical Activity Innovations LLC 开发的健身伴侣,通过一个小的无线传感器鞋垫跟踪全天的体力活动水平,并将数据通过低功耗蓝牙技术上传到手机或 PC。率先采用低功耗蓝牙的健身手表产品 MOTOACTV 也获得 CES2012 最佳蓝牙产品大奖。智能手机厂商也纷纷采用低功耗蓝牙技术,比如苹果从 iPhone4S 开始全面支持低功耗蓝牙技术, new iPad 和 MacBook 也开始集成低功耗蓝牙芯片, Android 和 Windows8 生态系统的产品也陆续集成了低功耗蓝牙功能,如 motorola 的 Droid RAZR 和 samsung 的 Galaxy Nexus 系列等。

随着各类低功耗蓝牙芯片的陆续推出,可以预计,未来几年内各类基于蓝牙 4.0 可穿戴和移动互联网产品的开发也会紧锣密鼓地进行,未来蓝牙 4.0 有可能成为移动设备的标准配置。

1.3 短距离低功耗通信技术对比

1.3.1 ZigBee

ZigBee 的应用目标是无线控制和监控应用,如工业远程控制、家庭自动控制等,这类应用一般不要求高的数据率,但须具有低功耗、低成本、实时性和使用方便等特点。ZigBee 技术规范的制定是由 ZigBee 联盟完成的。

ZigBee 联盟成立于 2001 年 8 月,联盟成员包括飞思卡尔、德州仪器、飞利浦等公司。ZigBee 联盟负责制定网络层及以上技术标准,而采用 IEEE 802.15.4 工作组制定的技术规范作为 ZigBee 物理层和 MAC 层技术标准,是一种经济、高效、可组网的新兴的短距离无线通信技术,主攻低价、低传输速率、短距离、低功耗的无线通信市场。2004 年和 2006 年 ZigBee 联盟分别发布了 ZigBee 规范 1.0 和 1.1 版本。2007 年 ZigBee 联盟发布了 ZigBee PRO 规范,2009 年还发布了面向消费类电子的 RF4CE 规范,目前已完成和正在进行制订的还包括面向健康监护、智能电网、家庭自动化、建筑自动化等领域的新技术规范。

1. ZigBee 与 IEEE 802.15.4

ZigBee 无线通信传输范围是 10~75 m,发射功率一般为 1 mW(0 dBm)~2.5 mW(4 dBm)。作为 ZigBee 的物理层技术规范,IEEE 802.15.4 的工作频段包括全球免许

可证的 2.4 GHz 频段、北美的 915 MHz 频段以及欧洲的 868 MHz 频段。868 MHz 频段时速率为 20 kbps(868~868.6MHz,带宽 0.6MHz,第 0 信道),915 MHz 频段时速率为 40 kbps(906~924MHz,带宽 2MHz,第 1~10 信道),2.4 GHz 频段时速率为 250 kbps(2405~2480MHz,5MHz 带宽,第 11~26 信道)。ZigBee 采用直接序列扩频(DSSS, Direct Sequence Spread Spectrum)技术,在 868/915MHz 与 2.4GHz 频段的调制方式也有所区别,分别是二相相移键控(BPSK)和偏移正交相移键控(O-QPSK)。

IEEE 802.15.4 的 MAC 定义了两种基本的操作模式:信标模式(beacon)和非信标(non-beacon)模式,它们对应的网络分别称为信标网络和非信标网络。在信标网络中规定了一种称作超帧(superframe)的格式。超帧的活跃部分被均匀划分为 16 个等长的时隙,每个时隙的长度由协调者决定,并通过信标帧广播到整个网络。协调者在超帧的开始发送信标帧;紧接着是竞争访问时期(Contention Access Period, CAP),在这段时间内各节点以竞争方式访问信道;之后是免竞争期(Contention-Free access Period, CFP),节点采用时分复用的方式访问信道;最后是非活跃期,节点进入休眠状态,等待下一个超帧周期的开始又发送信标帧。非信标网络则比较灵活,协调者无须周期性地发送信标帧,而仅在设备请求时才发送,节点均以竞争方式访问信道。由于在信标网络中存在周期性的信标,整个网络的所有节点都能进行同步,但这种同步网络的规模不会很大,一般适用于低延迟设备间的通信。在信标网络中,信道的竞争访问使用时隙 CSMA-CA 算法,这时每个设备的退避周期边界都应和超帧时隙的边界一致。而在非信标网络中,使用非时隙 CSMA-CA 算法,对退避周期边界不做任何要求。

IEEE 802.15.4 定义了两种器件:全功能器件(Full-Function Device, FFD)和简化功能器件(Reduced-function Device, RFD)。FFD 设备作为 PAN 协调器控制所有关联的 RFD 设备的同步、数据收发、成员管理等,可以与 PAN 网络内任何一种设备进行通信,而 RFD 设备只能和与其关联的 FFD 设备互通。IEEE 802.15.4 支持星型和点对点两种网络拓扑结构,并可基于此构建出更为复杂的 ZigBee 网络的拓扑结构,如 mesh、cluster-tree 等,如图 1-2 所示。

IEEE 802.15.4 中定义了两种类型的地址:扩展地址(extended address)和短地址(short address)。其中,64 位扩展地址是全球唯一地址,也称为 IEEE 地址,它是在设备加入 PAN 之前就分配好的。16 位短地址是设备加入 PAN 后所分配得到的网内局部地址,也称为网络地址。16 位短地址只能保证在本 PAN 内部是唯一的,所以使用 16 位短地址通信时必须结合其所属网络的 16 位 PAN ID 才有意义。为降低帧控制信息的开销,在 ZigBee 网络中主要使用 16 位短地址。

ZigBee 联盟对网络层协议和应用程序接口(Application Programming Interfaces, API)进行了标准化,如图 1-3 所示。ZigBee 所制定的网络层主要负责网络拓扑的搭建和维护,以及设备寻址、路由等,属于通用的网络层功能范畴。应用层包括应用支持子层(Application Support Sub-layer, APS)、应用框架(Application