

Internet of Things

物联网工程与技术规划教材

短距离无线通信 技术及应用

远波 赵春雨 主编

成 张具琴 王丽霞 胡 彬 副主编



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

物联网工程与技术规划教材

短距离无线通信技术的应用

柴远波 赵春雨 主编

林 成 张具琴 王丽霞 胡 彬 副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍短距离无线通信技术和通信网络的技术及应用,内容包括短距离无线通信概论、Wi-Fi 技术及应用、ZigBee 技术及应用、蓝牙技术及应用、超宽带 UWB 技术及应用、60GHz 无线通信技术及应用、无线自组织网络技术等,详细分析了 Wi-Fi 技术、蓝牙技术、ZigBee 技术三种短距离无线通信技术的基本理论、基本技术、基本方法,并兼顾具体实际应用。通过本书的学习,有助于读者尽快全面了解和掌握短距离无线通信系统技术,为其应用提供技术参考。

本书可作为大学本科通信工程或相关专业的教材,也可作为专业技术人员的学习和参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

短距离无线通信技术及应用 / 柴远波, 赵春雨主编. —北京: 电子工业出版社, 2015.4

物联网工程与技术规划教材

ISBN 978-7-121-25609-7

I. ①短… II. ①柴… ②赵… III. ①短距离—无线电通信—高等学校—教材 IV. ①TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 040528 号

策划编辑: 竺南直

责任编辑: 张 京

印 刷: 三河市华成印务有限公司

装 订: 三河市华成印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 15.25 字数: 387.2 千字

版 次: 2015 年 4 月第 1 版

印 次: 2015 年 4 月第 1 次印刷

印 数: 3000 册 定价: 38.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言



随着现代电子技术的快速发展,各种便携式电子设备(如智能手机、平板电脑、可穿戴设备等)已经越来越深入地影响着现代人的生活。这些便携式设备之所以可以如此广泛而深入地影响到我们,离不开现代通信技术的蓬勃发展,尤其是短距离无线通信技术的发展。无线通信技术的发展使人们可以随时随地联系到彼此,不仅丰富了人与人的联系方式,更是将“物”纳入通信体系,从而颠覆了人与物、物与物的联系方式,从而使我们可以更加直观而便捷地与生活环境进行“交流”。可以说,正是短距离无线通信技术的发展才使我们今天可以自由而普遍地和我们所赖以生存的这个世界发生千丝万缕的联系,而这种联系还将随着技术的发展变得更加自由、更加普遍、更加深入。

因此每一个人都有必要了解这些改变我们生活的技术,对于通信领域的学生和从业者而言更是如此,鉴于此,我们编写了本书。书中对当前主流的短距离无线通信技术进行了详细的介绍,既可作为初学者的启蒙读物,亦可作为深入学习者的参考读物。本书共分7章,其中:

第1章介绍了短距离无线通信技术的基本概念,对典型短距离无线通信技术的标准化进程及其特点进行了分析,详细分析了短距离无线传输信道的特点、信号传播特性及无线传输信道的建模方法,最后介绍了短距离无线通信技术的组网方式。

第2章介绍了IEEE 802.11标准,分析了Wi-Fi的物理层技术原理与协议、MAC层接入协议等,重点讨论了Wi-Fi网络架构和优化。

第3章介绍了ZigBee技术。ZigBee技术是一种低复杂度、低功耗、低速率、低成本、短距离的双向无线通信技术,主要由IEEE 802.15.4小组和ZigBee联盟两个组织负责标准规范的制定。该章主要介绍其协议规范及应用场景。

第4章介绍了蓝牙技术。该章以蓝牙技术发展过程中的典型技术特点为主线,分别介绍传统蓝牙、高速蓝牙及低功耗蓝牙的协议规范、技术特点及应用场景。

第5章概述超宽带技术的产生与发展及其技术特点,详细介绍了UWB信道传输特征,超宽带的关键技术,如调制与多址技术、无线脉冲成形技术等,还介绍了UWB的系统和实现方案及今后的研究方向。

第6章简要介绍了60GHz毫米波通信的技术特点、优势及其国内外发展现状,介绍了60GHz通信的关键技术,包括收发电路、天线等。

第7章介绍短距离无线通信组网技术,包括移动Ad hoc网络协议、TCP协议及Ad hoc网络低功耗技术等。

本书在黄河科技学院柴远波博士和中国电信河南省分公司林成博士的指导下,由赵春雨、王丽霞、张具琴、胡彬共同编写完成,其中赵春雨编写了第1章,王丽霞编写了第3章和第4章,张具琴编写了第5章和第6章,胡彬编写了第2章和第7章,赵春雨负责全书的统稿与校对。

由于作者水平有限,书中纰漏之处难免,敬请广大读者指正,不胜感激。

编 者

目 录

第 1 章 短距离无线通信概论	1
1.1 引言	1
1.2 典型的短距离无线通信技术	2
1.2.1 蓝牙网络技术	2
1.2.2 ZigBee 技术	7
1.2.3 Wi-Fi 技术	8
1.2.4 UWB 技术	12
1.2.5 60GHz 无线通信技术	13
1.2.6 主要短距离无线通信技术的比较	18
1.3 短距离无线传输信道	18
1.3.1 短距离无线信道的特点	19
1.3.2 大尺度传播特性	19
1.3.3 多径传播与小尺度传播特性	20
1.3.4 无线传输信道建模方法	21
1.3.5 短距离室内环境无线信道模型	21
1.4 无线自组织网络技术	24
1.4.1 无线自组织网络概述	24
1.4.2 无线自组织网络的定义及特点	25
1.4.3 无线自组织网络的应用场合	27
参考文献	28
第 2 章 Wi-Fi 技术及应用	29
2.1 IEEE 802.11 协议体系结构	30
2.1.1 物理层	30

2.1.2	数据链路层	33
2.1.3	IEEE 802.11 MAC 帧的格式	36
2.2	Wi-Fi 技术	40
2.2.1	Wi-Fi 的物理层技术原理与协议	40
2.2.2	扩频通信技术	41
2.2.3	Wi-Fi 的 MAC 层接入协议	44
2.3	Wi-Fi 网络架构和优化	49
2.3.1	ADSL 接入	49
2.3.2	LAN 接入	50
2.3.3	EPON 接入	51
2.3.4	AC 应用的网络架构	51
2.3.5	通过网络架构优化实现 Wi-Fi 网络质量提升	53
2.3.6	Wi-Fi 业务方式	54
2.3.7	Wi-Fi 网络质量优化建议	56
2.4	Wi-Fi 技术的应用与发展	57
2.4.1	Wi-Fi 技术的应用	57
2.4.2	Wi-Fi 技术的发展	57
	参考文献	58
第 3 章	ZigBee 技术及应用	59
3.1	ZigBee 技术概述	59
3.2	ZigBee 协议体系	61
3.2.1	物理层	63
3.2.2	媒体接入控制层	66
3.2.3	网络层	72
3.2.4	应用层	75
3.2.5	ZigBee 安全管理	77
3.3	ZigBee 网络构成	79
3.3.1	ZigBee 网络成员	79
3.3.2	ZigBee 网络的拓扑结构	82
3.3.3	ZigBee 网络的建立	83
3.3.4	ZigBee 路由协议	87
3.4	ZigBee 技术的应用	91
3.4.1	ZigBee 技术应用概述	91
3.4.2	ZigBee 技术典型应用：智能家居	91
	参考文献	94

第 4 章 蓝牙技术及应用	95
4.1 蓝牙技术概述	95
4.2 传统蓝牙技术	96
4.2.1 蓝牙无线规范	97
4.2.2 蓝牙基带规范	98
4.2.3 蓝牙的其他几个重要协议	108
4.3 高速蓝牙技术	112
4.3.1 PAL 协议	112
4.3.2 PAL 物理链路管理器	114
4.3.3 逻辑链路管理器	117
4.3.4 数据管理器	117
4.4 低功耗蓝牙技术	118
4.4.1 BLE 协议栈	119
4.4.2 BLE 底层协议	120
4.4.3 BLE 中间层协议	121
4.4.4 BLE 高层协议	126
4.5 蓝牙 4.1	128
4.6 蓝牙技术的应用	129
参考文献	130
第 5 章 超宽带 UWB 技术及应用	131
5.1 UWB 技术概述	131
5.1.1 UWB 技术的定义	131
5.1.2 UWB 技术的特点	134
5.1.3 UWB 的信道传播特征	137
5.2 UWB 的关键技术	139
5.3 UWB 技术的标准化方案	145
5.3.1 DS-UWB 方案	146
5.3.2 MB-OFDM-UWB 方案	146
5.3.3 IEEE 802.15.4a 低速 UWB 标准化	147
5.3.4 我国 UWB 标准化工作	148
5.4 UWB 的系统方案	149
5.4.1 单频带系统	150
5.4.2 多频带系统	150

5.5 UWB 的应用	152
5.5.1 UWB 的应用概述	152
5.5.2 UWB 室内无线通信应用举例	155
参考文献	164
第 6 章 60GHz 无线通信技术应用	166
6.1 60GHz 无线通信技术概述	167
6.1.1 60GHz 无线通信技术发展概况	167
6.1.2 60GHz 的特点和优势	170
6.2 60GHz 无线通信的标准化	175
6.3 60GHz 无线通信关键技术研究	179
6.4 60GHz 无线通信的应用	185
参考文献	188
第 7 章 无线自组织网络技术	190
7.1 Ad hoc 网络协议	191
7.1.1 移动 Ad hoc 网络 MAC 协议	191
7.1.2 移动 Ad hoc 网络路由协议	202
7.2 移动 Ad hoc 网络的 TCP 协议	214
7.2.1 TCP 在移动 Ad hoc 网络中遇到的问题	214
7.2.2 移动 Ad hoc 网络中 TCP 的方案	216
7.3 移动 Ad hoc 网络的低功耗技术	225
7.3.1 协议栈各层涉及的节能问题	226
7.3.2 两种主要的节能机制	228
参考文献	231
附录 A 缩略词	233

第 1 章

短距离无线通信概论



1.1 引言

随着 Internet 技术、计算机技术、通信技术和电子技术的飞速发展，以及人们对信息随时随地获取和交换的迫切需要，无线通信开始在人们的生活中扮演着越来越重要的角色，显示出巨大的发展潜力。而在这其中，作为无线通信技术的一个重要分支——短距离无线通信技术因其在技术、成本、可靠性及可实用性方面的突出优势，正逐渐引起人们越来越广泛的关注。短距离无线通信技术的范围很广，在一般意义上，只要通信收发双方通过无线电波传输信息，并且传输距离限制在较短的范围内，就可以称为短距离无线通信。

短距离无线通信涵盖了无线个域网（Wireless Personal Area Networks, WPAN）和无线局域网（Wireless Local Area Networks, WLAN）的通信范围。其中 WPAN 的通信距离可达 10m 左右，而 WLAN 的通信距离可达 100m 左右。除此之外，通信距离在毫米至厘米量级的近距离无线通信（Near Field Communication, NFC）技术和可覆盖几百米范围的无线传感器网络（Wireless Sensor Networks, WSN）技术的出现，进一步扩展了短距离无线通信的涵盖领域和应用范围。

从通信速率看，短距离无线通信应用中有几千比特（Kilobit）的低速率的 RFID 技术，也有支持高速率的可达几吉比特（Gigabit）的 60GHz 毫米波个域网通信（Millimeter-wave WPAN）技术；从通信模式看，有点到点（Point-to-Point）、点到多点（Point-to-multipoint）链接的蓝牙（Bluetooth）技术，也有具备网状网拓扑（Mesh Networking Routing）结构的 ZigBee 技术；有以人体为核心的无线个域网（Wireless Personal Area, WPA），也有以机动车辆为主角的车域网（Vehicle Area Networks, VAN），而红外线通信（Infrared Data Association, IrDA）和可见光通信（Visible Light Communications, VLC）更进一步拓展了短距离无线

应用的通信方式。各种短距离无线通信技术的应用范围既相互交叉重叠，又彼此补充。

短距离无线通信以无线个域（Wireless Personal Area，WPA）应用为核心特征。随着 RFID 技术、ZigBee 技术、蓝牙 V4.0 技术及 60GHz 毫米波通信等低、高速无线应用技术的发展，短距离无线通信正深入到通信应用的各个领域，表现出广阔的应用前景。

短距离无线通信有如下特点。

（1）低功耗（Low Power）：由于短距离无线应用的便携性和移动特性，低功耗是基本要求；另一方面，多种短距离无线应用可能处于同一环境之下，如 WLAN 和微波 RFID，在满足服务质量的要求下，要求有更低的输出功率，避免造成相互干扰。

（2）低成本（Low Cost）：短距离无线应用与消费电子产品联系密切，低成本是短距离无线应用能否推广和普及的重要决定因素。此外，如 RFID 和 WSN 应用，需要大量使用或大规模敷设，成本成为技术实施的关键。

（3）多为室内环境下（Indoor Environments）应用：与其他无线通信不同，由于作用距离限制，大部分短距离应用的主要工作环境是在室内，特别是 WPAN 应用。

（4）使用 ISM 频段：考虑到产品和协议的通用性及民用特性，短距离无线技术基本上使用免许可证 ISM（Industrial，Scientific and Medical）频段。

（5）电池供电（Battery Driven）的收发装置：短距离无线应用设备一般都有小型化、移动性要求。在采用电池供电后，需要进一步加强低功耗设计和电源管理技术的研究。

1.2 典型的短距离无线通信技术

一般来讲，短距离无线通信可分为高速短距离无线通信和低速短距离无线通信两大类。高速短距离无线通信最高数据传输速率大于 100Mb/s，通信距离小于 10m；低速短距离无线通信最低数据传输速率小于 1Mb/s，通信距离小于 100m。目前使用较广泛的短距离无线通信技术有蓝牙、无线局域网 802.11（Wi-Fi）、ZigBee、超宽带等。

高速短距离无线通信技术目前主要用于连接下一代便携式消费电器和通信设备。它支持各种高速率的多媒体应用、高质量声像配送、多兆字节音乐和图像文档传送等。低速短距离无线通信技术主要用于家庭、工厂与仓库的自动化、安全监视、保健监视、环境监视、军事行动、消防队员操作指挥、货单自动更新、库存实时跟踪及游戏和互动式玩具等方面的低速应用。本节将对几种典型的短距离无线通信技术做一个简要描述，使读者对短距离无线通信网络的主要技术有一个总体的认识和了解。

1.2.1 蓝牙网络技术

蓝牙网络技术最早要追溯到 20 世纪 90 年代中期，在 1994 年，爱立信（Ericsson Mobile）着手研究在移动电话和它的附件间实现低成本、低功耗的无线接口的可能性。伴随项目的

推进过程,爱立信开始注意到短距无线通信(Short Distance Wireless Communication)的应用前景非常广阔。该无线通信技术被爱立信取名为蓝牙(Bluetooth),希望其在世界范围统一和发展。

在1998年5月,爱立信与英特尔(Intel)、诺基亚(Nokia)、IBM和东芝(Toshiba)这四家公司共同成立蓝牙特殊利益小组(Special Interest Group, SIG),负责制定蓝牙的技术标准和进行产品的测试,同时调节全球蓝牙技术的具体应用。随着蓝牙技术的不断发展,SIG的成员也迅猛发展,几乎覆盖了全球各行各业,包括通信厂商、网络厂商、外设厂商、芯片厂商、软件厂商等,甚至消费类电器厂商和汽车制造商都加入了SIG。蓝牙应用产品通过SIG的测试就可以投放市场。从2000年年初,自从蓝牙芯片开始发售,以爱立信、摩托罗拉(Motorola)、剑桥硅无线电(Cambridge Silicon Radio, CSR)、德州仪器(Texas Instrument, TI)、飞利浦(Philips)等为首的众多公司都已经开始制造和出售蓝牙芯片,蓝牙产品的体积越做越小,价格越降越低。

目前,蓝牙技术规范累计颁布了6个版本:1.x/2.0/2.1/3.0/4.0/4.1,其标准规格不断得到更新和增强。各个版本的特点如下。

(1) 蓝牙技术联盟于1999年7月公布1.0版,即基本速率BR,2001年公布了1.1版,为最早期版本,传输率约在748~810Kb/s,因是早期设计的,容易受到同频率产品干扰,影响通信质量。1.2版同样只有748~810Kb/s的传输速率,但在以前的基础上加上了抗干扰跳频功能。1.1/1.2版本的蓝牙产品,本身基本可以支持Stereo音效的传输要求,但只能以单工方式工作,加上音带频率响应不太足够,并不算是最好的Stereo传输工具。v1.x版本的蓝牙技术带有实验性质,较少被生产厂商采用。

(2) Bluetooth 2.0+EDR标准在2004年11月4日推出,在技术上作了大量的改进,但从1.x标准延续下来的配置流程复杂和设备功耗较大的问题依然存在。V2.0+EDR是1.2版的改良提升版,和V1.x比主要升级体现在传输速度上,实际速度在1.8Mb/s~2.1Mb/s,可以有双工的工作方式。即作语音通信的同时亦可传输高质量图片,2.0版本也支持Stereo运作。2.0+EDR在保证立体声传输的基础上加大了数据流的带宽传输,可以用于较高品质的音乐播放。稍后蓝牙2.0版本的芯片加入了Stereo译码芯片,连A²DP(Advanced Audio Distribution Profile)也不需要。但该版本由于配对困难,相应的设备仍然很少,该标准目前处于作废通知期。

(3) Bluetooth 2.1+EDR。为了解决蓝牙技术存在的问题,蓝牙技术联盟SIG(Special Interest Group)在2007年7月26日推出了Bluetooth 2.1+EDR。V2.1+EDR相比V2.0+EDR的主要升级体现在快速配对技术SSP的采用。

① 改善装置配对流程。不管是单次配对还是永久配对,配对的过程与必要操作过于繁杂。许多使用者在进行硬件之间的蓝牙配对时常会遇到很多问题。以往在连接过程中,需要利用个人识别码来确保连接的安全性,而改进后的连接方式则是自动使用数字密码来进行配对与连接。举例来说,只要在手机选项中选择连接特定装置,手机会自动列出目前环境中可使用的设备,并且自动进行连接。而在短距离配对方面,也具备了在两个支持蓝牙的手机之间进行配对与通信传输的NFC(Near Field Communication)机制。NFC是

短距离无线 RFID 技术, 针对 1~2 公尺短距离联机应用, 以电磁波为基础, 取代传统无线电传输。由于 NFC 机制掌控了配对的起始侦测, 当范围内的两台装置要进行配对传输时, 只要简单地在手机屏幕上选择是否接受联机即可。不过要应用 NFC 功能, 系统必须内建 NFC 芯片或具备相关的硬件功能。

② 更佳的省电效果。蓝牙 2.1 版加入了 Sniff Subrating 功能, 透过设定在两个装置之间互相确认信号的发送间隔来达到减小功耗的目的。一般来说, 当两个进行连接的蓝牙装置进入待机状态后, 蓝牙装置之间仍需要透过相互呼叫来确定彼此是否仍在联机状态, 因此, 蓝牙芯片必须随时保持在工作状态, 即使手机的其他组件都已经进入休眠模式。为了改善了这样的状况, 蓝牙 2.1 将装置之间相互确认的信号发送时间间隔从旧版的 0.1s 延长到 0.5s 左右, 如此可以让蓝牙芯片的工作负载大幅降低, 也可让蓝牙有更多的时间彻底休眠。采用此技术之后, 蓝牙装置在开启蓝牙联机后的待机时间可以有效延长 5 倍以上。蓝牙 2.1 是目前设备数量最多的版本。

(4) 2009 年 4 月 21 日, 蓝牙技术联盟正式颁布了新一代标准规范: 蓝牙核心规范 3.0 版 高速 (Bluetooth Core Specification Version 3.0 High Speed)。根据 802.11 适配层协议应用了 Wi-Fi 技术, 即在蓝牙配对后, 在需要时调用 802.11 Wi-Fi 协议用于实现高速数据传输。理论上最高传输速度可达到 24Mb/s, 是蓝牙 2.0 的 8 倍。“+HS” (High Speed) 是选配技术, 并非所有的蓝牙 3.0 均支持 24Mb/s 的传输速度。蓝牙 3.0 的核心是 “Generic Alternate MAC/PHY” (AMP), 这是一种全新的交替射频技术, 允许蓝牙协议栈针对任一任务动态地选择正确射频。最初被期望用于新规范的技术包括 802.11 及 UMB, 但是新规范中取消了 UMB 的应用。作为新版规范, 蓝牙 3.0 的传输速度更高, 关键就在 802.11 无线协议。通过集成 802.11 PAL (协议适应层), 蓝牙 3.0 可以轻松用于录像机至高清电视、PC 至 PMP、UMPC 至打印机之间的传输面, 通过蓝牙高速传送大量数据自然会消耗更多的能量, 但是由于引入了增强电源控制 (EPC) 机制, 再辅以 802.11, 实际空闲功耗会明显降低, 蓝牙设备的待机耗电问题得到初步解决。

(5) 2010 年 6 月 30 日, 蓝牙技术联盟正式采纳蓝牙 4.0 核心规范, 并启动对应的认证计划。蓝牙 4.0 包括三个子规范, 即传统蓝牙技术、高速蓝牙和新的蓝牙低功耗技术。蓝牙 4.0 的改进之处主要体现在三方面: 电池续航时间、节能和设备种类。拥有低成本、跨厂商互操作性, 3ms 低延迟、100m 以上超长距离、AES-128 加密等诸多特色。此外, 蓝牙 4.0 的有效传输距离也有所提升。当前, 蓝牙的有效传输距离为 10m (约 30 英尺), 而蓝牙 4.0 的有效传输距离可达到 100m (约 200 英尺)。V4.0 是 V3.0+HS 的补充, 在 “经典规范” (可以看作 V2.1 的升级) 和 “高速规范” (+HS) 两个标准之上, 增加了 “低功耗规范 (Bluetooth Low Energy)”。在硬件的实现上, 蓝牙 4.0 可以在现有经典蓝牙 (2.1+EDR/3.0+HS) 芯片上增加低功耗部分 (双模式), 也可以在高度集成的设备中增加一个独立的连接层, 实现超低功耗的蓝牙传输 (单模式)。虽然 V4.0 在 2010 年就推出了, 但除 iPhone4S、Galaxy S3、Note2 支持蓝牙 4.0 外, Android 4.2 原生系统缺乏对 4.0 的支持, 因此 4.0BLE 连接尚未普及。预计低功耗蓝牙 4.0 会随着 Android 4.3 的升级得到更普遍的运用。

(6) 2013 年 12 月 3 日, 蓝牙技术联盟正式推出蓝牙 4.1 版本。如果说蓝牙 4.0 主打的是省电特性的话, 那么此次升级蓝牙 4.1 的关键词应是 IOT: 全联网, 也就是把所有设备都连网的意思。为了实现这一点, 对通信功能的改进是蓝牙 4.1 最为重要的改进之一。首要的就是批量数据的传输速度, 这一改进主要针对的是刚刚兴起的可穿戴设备。例如, 已经比较常见的健康手环, 其发送出的数据流并不大, 通过蓝牙 4.1 能够更快速地将跑步、游泳、骑车过程中收集到的信息传输到手机等设备上, 用户就能更好地实时监控运动状况, 这是很有用处的。当然这并不意味着可以用蓝牙高速传输流媒体视频。蓝牙 4.1 中, 允许设备同时充当“Bluetooth Smart”和“Bluetooth Smart Ready”两个角色的功能, 这就意味着能够让多款设备连接到一个蓝牙设备上。举个例子, 一个智能手表既可以作为中心枢纽, 接收从健康手环上收集的运动信息, 又能作为一个显示设备, 显示来自智能手机上的邮件、短信。借助蓝牙 4.1 技术的智能手表、智能眼镜等设备就能成为真正的中心枢纽。

为方便读者对比, 将各代蓝牙技术规范列于表 1.1。

表 1.1 各代蓝牙技术规范的对比

时间	版本	理论峰值	配对	加密算法	其他改进
1999	1.0/1.08	721Kb/s	Legacy Pairing	NA	1.0 及以前为实验版本
2001	1.1			NA	修正了 1.0 错误, 增加了非加密通道
2003	1.2			NA	发现连接速度提高, 传输速度提高, 降低无线电干扰
2004.11	2.0+EDR	3Mb/s	SSP	GPSK PSK	实际速度约为 2.1Mb/s
2007.7	2.1+EDR				当前应用最广泛的蓝牙
2009.4	3.0+HS	24Mb/s			高速传输, 需 802.11 (Wi-Fi) 链接
2010.7	4			AES	1. 官方名称 Bluetooth Smart, 其他名 ULP/BLE/Wibree; 2. 能耗降至 3.0 及以前标准的 1%~50%
2013.12	4.1				1. 与 4G 不构成干扰, 同时使用 4G 和 BT 双方速度不下降; 2. 通过 IPV6 连接到网络; 3. 可同时收发数据

此外, 以通信距离来看不同版本可再分为 Class A 和 Class B。Class A 用在大功率/远距离的蓝牙产品上, 但因成本高和耗电量大, 不适合用于个人通信产品, 故多用在部分商业特殊用途上, 通信距离大约在 80~100m 之间。

Class B 是目前最流行的制式, 通信距离大约在 8~30m 之间, 视产品的设计而定, 多用于手机内/蓝牙耳机/蓝牙 Dongle 的个人通信产品上, 耗电量和体积较小, 方便携带。

目前, 蓝牙技术已经成为短距离无线数据通信领域最热门的研发方向, 已有超过 2000 家企业宣布支持和开发蓝牙技术及相关产品。从 2000 年年初蓝牙芯片出现以来, 欧美多家公司都已经开始研制和发售蓝牙芯片和模块, 产品的体积越来越小, 价格越来越低。这些产品涉及移动电话、个人数字助理、耳机、打印机、数码相机无线网络接入点和键盘、

鼠标等各个领域。

蓝牙技术的实质是要建立通用的无线空中接口及其控制软件的公开标准,使通信和计算机进一步结合,使不同厂家生产的便携式设备可以在没有电线或电缆相互连接的情况下,在近距离范围内具有互用、互操作的性能。它的一般连接范围为 10cm~10m 之间;如果增加传输功率,其连接范围可以扩展到 100m。

蓝牙是一种低功耗短距的无线通信技术,它是实现数据和语音通信的无线传输全球开放性标准。由于蓝牙体积小、功耗低,其应用已经不再局限于计算机的外围设备。蓝牙技术能够被集成到几乎任何数字设备中,尤其是那些对数据传输速率要求不太高的便携设备和移动设备上。蓝牙技术特点归纳为如下几个方面。

(1) 蓝牙技术在全球范围内适用。蓝牙工作于 2.4GHz 工业、科学和医学 (Industrial, Scientific and Medical, ISM) 频段,而全球绝大多数国家的这个频段范围都位于 2.4~2.4835GHz 之间,因此该频段的使用是不需要申请的。

(2) 蓝牙技术可同时进行语音与数据传输。蓝牙采用了分组交换与电路交换技术,它支持同步语音信道、异步数据信道及同步语音与异步数据同时传输的信道。而语音信道的数据传输速率是 64 K b/s。采用非对称的信道进行数据传输时,最高速率是 721 Kb/s,最高反向速率是 57.6 Kb/s;采用对称的信道进行数据传输时,最高速率是 342.6 Kb/s。

蓝牙系统中有两种物理链路类型:异步无连接链路 (Asynchronous ConnectionLess, ACL) 和同步面向连接链路 (Synchronous Connection Oriented, SCO)。其中 ACL 链路是微微网内实现主设备和所有从设备间同步或异步数据分组交换的链路,其主要适用于对时间不太敏感的数据通信,如控制信令或文件数据等。而 SCO 链路则是一条对称的、点对点的同步数据交换的链路,是由微微网内主设备维护的,它主要用于对实时性要求非常高的数据通信类型,如视频等。

(3) 蓝牙能够组建临时性对等连接 (Ad hoc Connection)。依据在网络中蓝牙设备扮演的不同角色,可将其区别为主设备 (Master) 和从设备 (Slave)。蓝牙在组网连接时主动发起连接的那个设备是主设备,而从设备是响应连接的一方。当许多蓝牙设备通过连接而建起单个微微网时,其中仅有一个设备能成为主设备,其余的都是从设备。

蓝牙最基本的一种组网形式就是微微网,由独个主设备与独个从设备组成点对点的连接。而在时空上相互重叠的很多微微网所构成的更为复杂的网络拓扑结构则称之为散射网 (Scatternet)。

(4) 蓝牙技术的调制方式和传输速率。蓝牙 V1.1 与 V1.2 标准均采用 BT=0.5,而调制指数范围是 0.28~0.35。高斯滤波的二进制频移键控的调制方式支持 1Mb/s 的传输速率。在 2004 年年底, SIG 发布了采用相移键控调制模式的标准即蓝牙 V2.0-EDR,可以支持最高 2Mb/s 的数据传输速率。

(5) 蓝牙技术具有非常好的抗干扰能力。无线电设备有很多种类是工作在 ISM 频段的,如 802.11 (Wi-Fi) 局域网、HomeRF 和家庭专用微波炉等产品,为了更好地抵制从这些设备发出的干扰,蓝牙采用跳频 (Frequency Hopping) 的方法去扩充它的频谱 (Spread Spectrum),把 2.402~2.48GHz 的频段分成了 79 个频点,使得间隔 1MHz 可得到相邻的

频点。蓝牙设备在其中某固定频点发送完数据后，才会再跳至另外的不同频点进行发送，而频点间排列的顺序是个伪随机序列，频率是 1600 次每秒，而任何一个频率的保持时间是 $625\mu\text{s}$ 。

(6) 蓝牙模块的体积非常小，使可方便地嵌入各种设备中。嵌入移动设备的里的蓝牙模块的体积比移动设备要小。例如 CSR 公司研发的蓝牙芯片，BC05 的芯片面积只有 $8\text{mm}\times 8\text{mm}$ 。

(7) 蓝牙设备的功耗非常低。当蓝牙处于通信连接状态时，蓝牙设备包括如下四种不同的模式：激活模式、呼吸模式、保持模式及休眠模式。激活模式是常规的工作模式，而其他三种模式都是为了减少能耗而定义的。在呼吸模式下，从设备会被周期性地激活；而在保持模式下，从设备会暂停监听从主设备发过来的数据分组，但会维持它的激活成员的地址。在休眠模式下，主设备和从设备间也能够保持同步，但从设备无须维持它的激活成员的地址。在这三种低功耗模式里，呼吸模式的功耗是最高的，对主设备响应的速度也是最快的，休眠模式功耗是最低的，但是对主设备响应的速度是最慢的。

(8) 蓝牙技术具有公开的接口标准。为促进蓝牙技术的推广，SIG 将蓝牙技术的标准完全公开，使全球范围内任何单位与个人都能开发蓝牙产品，最终只要被 SIG 蓝牙产品兼容性地测试过关，就可以将产品推进市场。如此一来，SIG 就能通过售出蓝牙芯片与供给蓝牙技术服务等业务来获利，蓝牙应用程序也是可以得到大规模推广的。

(9) 蓝牙产品成本低，而集成蓝牙技术的产品的成本增加很少。在蓝牙产品最初面世的时候，其价格非常高，单是蓝牙耳机就售价折合人民币约四千元。但是伴随市场需求的增大及供应商不断提供大量的蓝牙芯片与模块，使得蓝牙产品价格迅速下滑。

1.2.2 ZigBee 技术

为了解决 WSN 中小型、低成本设备无线连网的要求，2002 年，电器和电子工程师协会 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) 成立了 IEEE 802.15.4 工作组。该工作组定义了一种廉价的、供便携或移动设备使用的极低复杂度、低成本、低功耗和低速率无线连接技术。ZigBee 正是这种技术的商业化命名。ZigBee 这个名字最初来源于蜂群所使用的赖以生存和发展的通信方式，蜜蜂通过 ZigBee 形状的舞蹈来分享新发现的食物源的位置、距离和方向等信息。2003 年 11 月，IEEE 正式发布了该项技术的物理层 (Physical Layer, PHY) 和媒体访问控制层 (Medium Access Control Sub-Layer, MAC) 所采用的协议标准，即 IEEE 802.15.4 协议标准，作为 ZigBee 技术物理层和媒体接入层的标准协议；2004 年 12 月，ZigBee 联盟在 IEEE 802.15.4 协议的基础上，正式发布了完整的 ZigBee 技术标准。2006 年 IEEE 发布了 IEEE 802.15.4 协议标准修订版。

ZigBee 是建立在 IEEE 802.15.4 标准之上的，IEEE 规定了 ZigBee 的物理层和媒体访问控制层，网络层、应用支持子层和高层应用规范由 ZigBee 联盟制定。ZigBee 无线通信标准相对于其他的无线通信标准具有比较明显的特点和优势，如低成本、易实现、可靠的数据传输、短距离操作、极低功耗、各层次的安全性等。ZigBee 无线网络具有如下特点。

(1) 极低的系统功耗。由于传输速率低, 通信距离短, 其发射功率仅为 1mW, 而且 ZigBee 芯片的多种电源管理模式可以有效地对节点的工作和休眠进行配置, 从而使得系统在不工作时可以关闭无线设备, 极大地降低系统功耗, 节约电池能量。据估算, 一个 ZigBee 终端设备采用一节普通容量的锂电池就可以维持 0.5~3 年的使用时间。

(2) 较低的系统成本。与其他网络技术相比, ZigBee 协议比较简单, 能够运行在计算能力与存储能力都非常有限的 MCU 上, 适用于成本控制严格的场合。现有的 ZigBee 芯片都是基于 8051 单片机内核的, 成本很低。

(3) 安全的数据传输。由于无线通信是共享信道的, 面临着众多有线网络所没有的安全威胁。ZigBee 在底下的物理层与 MAC 层采用 IEEE 802.15.4 标准, 使用载波检测多址访问与冲突避免 (CSMA-CA) 的数据传输方法, 并与确认和数据检验等措施结合, 可保证数据的可靠传输。

(4) 灵活的工作频段。无线通信要占用一定的频谱, 而频谱是一种政府管理的资源, 使用某些频段必须取得相关部门的许可。ZigBee 采用“免注册”频段, 即无须得到许可便可使用的工业、科学、医疗频段, 以便于用户能够自由使用 ZigBee 设备。根据世界各国的情况, ZigBee 定义了 2.4GHz 频段和 868/915MHz 频段, 其中 2.4GHz 在全球通用, 868/915MHz 频段分别用于欧洲和北美。我国使用的 ZigBee 设备工作在 2.4GHz 频段, 传输速率分为 250Kb/s、20Kb/s 和 40Kb/s 三个级别。免注册频段和较多的信道使 ZigBee 的使用更加方便灵活, 特别是选用 2.4GHz 频段的设备, 可以在全世界任何地方使用。ZigBee 技术自发布以来因其在特定场景短距离无线通信上的优越表现引起了广泛的关注, 与其相关的产业链发展得也较为完整。

在硬件方面, TI、Ember、Jennic、Freescale 等各大芯片公司均推出无线收发芯片和单片机射频芯片集成在一块的 SOC (系统级芯片)。特别是 SOC 节点方案, 进一步减小了功耗、缩小了体积、降低了成本, 满足市场需求。现在市场上比较成熟的有 CC2430、CC2530、EM250 等。其中 TI 公司的 CC2430、CC2530 集成 SOC 方案尤为成熟, 应用最为广泛。

在软件方面, 有许多公司如 TI、Ember、AirBee、Freescale 等提供了 ZigBee 协议栈, 其中最适用的是 TI 设计的 Z-Stack 协议栈, 提供了一个完全开源的技术解决方案。另一个占据市场份额较大的 ZigBee 射频芯片供应商 Freescale 也推出了相应的 Z-Stack。

在开发平台方面, 各大 ZigBee 芯片供应商都推出了相应的开发平台, 目前市场上较为成熟的有 Freescale 提供的 SARD 应用参考板、Microchip 提供的 PICDEM Z Demonstration Kit 开发板、Helicomm 提供的 EZ-Net DevKit, TI 公司提供了有关 CC2430 和 CC2530 的一些开发工具。有兴趣进行 ZigBee 应用开发的读者可以访问这些公司的官网以获得更详尽、完整的技术信息。

1.2.3 Wi-Fi 技术

无线技术与有线技术的区别之一是标准不统一, 不同的标准有不同的应用。目前, 无