

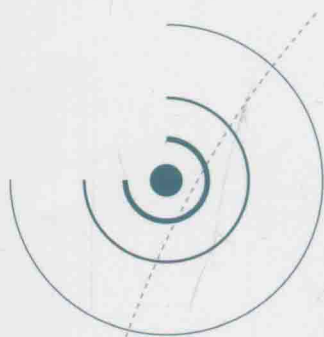


北京理工大学“985工程”国际交流与合作专项资金资助图书

Frequency-Modulated Ultra-Wideband Transceivers: Analysis and Design — for Biomedical, WBAN and WPAN

超宽带调频收发机的分析与设计 ——针对医疗电子、无线体域网及无线个人网

周波 (Bo Zhou) 著
[美] 姜培 (Patrick Chiang)



北京理工大学“985工程”国际交流与合作专项资金资助图书

超宽带调频收发机的 分析与设计

——针对医疗电子、无线体域网及无线个人网

周 波 (Bo Zhou)

[美] 姜培 (Patrick Chiang)

著

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书阐述了超宽带调频收发机的系统架构和工作原理,给出了多款收发机设计实例及测试结果;介绍了众多模拟和射频子模块的结构及电路实现;详细阐释了发射机及接收机设计,并给出了系统级功耗优化方案。

全书内容共分8章:第1章介绍超宽带调频技术的应用及优势;第2章阐述超宽带调频的原理、收发机架构及系统设计考虑;第3章介绍子载波生成的结构和电路设计,并给出芯片Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ的测试结果;第4章讨论射频频率调制及中心频率校正的电路实现,并给出芯片Ⅳ和Ⅴ的测试结果;第5章阐述宽带射频鉴频器及子载波处理的架构设计和电路实现,并给出芯片Ⅵ和Ⅶ的测试结果;第6章介绍超宽带调频收发机的射频前端模块及超宽带天线的设计,并给出系统级测试方案、测试结果和链路预算;第7章阐述低功耗收发机设计,提出系统级功耗优化方案,并给出芯片Ⅷ的测试结果;第8章补充介绍超宽带调频发射机的另类实现。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

超宽带调频收发机的分析与设计:针对医疗电子、无线体域网及无线个人网/周波,(美)姜培著. —北京:北京理工大学出版社,2015.12

ISBN 978-7-5682-1364-6

Ⅰ. ①超… Ⅱ. ①周… ②姜… Ⅲ. ①无线电台 Ⅳ. ①TN924

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第267364号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/保定市中华美凯印刷有限公司

开 本/710毫米×1000毫米 1/16

印 张/10

字 数/163千字

版 次/2015年12月第1版 2015年12月第1次印刷

定 价/36.00元

责任编辑/封雪

文案编辑/封雪

责任校对/周瑞红

责任印制/王美丽

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前言

超宽带调频 (FM-UWB) 技术已成为无线体域网 (WBAN) 和无线个人网 (WPAN) 青睐的短距离、低功耗、低成本无线通信技术。它的诸如穿透性强、辐射小、保密性好、设计简单、功耗低等适合人体通信环境的特点,使得它在生物医疗电子领域有着巨大的应用前景。

基于近年来在超宽带调频收发技术上累积的科研经历和发表的科研论文,反复查阅大量文献,编者系统梳理了多年来的研究心得,将所学、所思、所感、所悟记录下来,一是供同行或后来者交流和参考,二是自身再学习再思考的过程。

本书阐述了 FM-UWB 收发机的系统架构和工作原理,给出了多款 FM-UWB 收发机的设计实例及测试结果;介绍了 FM-UWB 众多模拟和射频子模块的结构及电路实现;详细阐释了发射机和接收机设计,并给出系统级功耗优化方案。

全书内容共分 8 章:第 1 章介绍超宽带调频技术的应用及优势;第 2 章阐述超宽带调频的原理、收发机架构及系统设计考虑;第 3 章介绍子载波生成的结构和电路设计,并给出芯片 I、II 和 III 的测试结果;第 4 章讨论射频频率调制及中心频率校正的电路实现,并给出芯片 IV 和 V 的测试结果;第 5 章阐述宽带射频鉴频器及子载波处理的架构设计和电路实现,并给出芯片 VI 和 VII 的测试结果;第 6 章介绍超宽带调频收发机的射频前端模块(输出放大器、预放大器)及超宽带天线的设计,并给出系统级测试方案、测试结果和链路预算;第 7 章阐述低功耗收发机设计,提出系统级功耗优化方案,并给出芯片 VIII 的测试结果;第 8 章介绍超宽带调频发射机的另类实现,作为全书内容的补充,加深读者对超宽带调频的认识。

本书专业性和实用性都很强,兼顾工程设计和科研创新,注重低功耗、低成本设计考虑。本书自成体系,脉络清晰,便于自学,主要面向模拟、射频集成电路从业人员,包括微电子专业的在校研究生和半导体行业

的研发工程师，尤其适合那些从事超宽带技术研发的同行。

本书在编写过程中，得到了清华大学王志华教授和李宇根（Woogeun Rhee）教授的悉心指导。此外，天津大学的陈霏老师、俄勒冈州立大学的祁楠博士和续阳博士也给出了宝贵的修改意见。本书的相关科研工作，获得国家自然科学基金（61306037）、北京市自然科学基金（4153063）、北理工校基础研究基金（20130542009）、国家公派留学基金（201406035016）的支持。

本书的出版得到了北京理工大学“985 工程”国际交流与合作专项资金的资助和国家外国专家局“外国文教专家项目”的大力支持，在此表示衷心的感谢。本书的形成还得益于北京理工大学出版社同志们大量而细致的编辑工作，在此一并表示感谢。家人的理解、支持和无私的爱，是编者进行科研工作的动力，谨以此书送给我们的父母和妻儿。

限于编者水平，书中难免存在不妥和错误之处，欢迎广大读者批评指正。

作者

2015 年 6 月

目 录

第 1 章 FM-UWB 的应用及优势	1
1.1 超宽带技术	1
1.2 UWB 的分类	2
1.2.1 IR-UWB	3
1.2.2 FM-UWB	4
1.2.3 Chirp-UWB	5
1.3 UWB 在 WBAN/WPAN 及 BioMedical 上的应用	6
1.4 FM-UWB 的优势	9
1.5 本书内容安排	10
第 2 章 FM-UWB 的原理、架构及系统设计考虑	13
2.1 FM-UWB 的原理及收发机架构	13
2.2 FM-UWB 收发机子模块的实现	14
2.2.1 子载波生成	14
2.2.2 射频频率调制及中心频率校正	18
2.2.3 宽带射频鉴频器	25
2.2.4 子载波处理	26
2.3 FM-UWB 收发机的系统参数	28
2.4 FM-UWB 收发机的设计考虑	29
2.4.1 有限模和 Δ - Σ 的比较	29
2.4.2 多相与单相结构的比较	30
2.4.3 高数据率实现	31
2.4.4 子载波波形选择及失真考虑	33
2.4.5 子载波调制因子的选择	35
2.4.6 射频调制因子的选择	36
2.4.7 低功耗设计考虑	37

2.4.8 可重构设计	39
2.5 本章小结	40
第3章 子载波生成	41
3.1 子载波生成的架构实现	41
3.2 子载波生成的电路实现	42
3.2.1 PFD	42
3.2.2 电荷泵	43
3.2.3 相位选择与双模分频器	44
3.2.4 小数调制器	45
3.3 子载波生成的核心模块——多相 Relax VCO	47
3.3.1 常见的两相结构	48
3.3.2 新型的四相结构	49
3.3.3 独特的八相结构	51
3.4 带 Hybrid-FIR 滤波特性的子载波生成	53
3.5 测试结果	55
3.5.1 FSK 子载波生成的测试结果	56
3.5.2 多相 Relax VCO 的测试结果	60
3.6 本章小结	63
第4章 射频频率调制及中心频率校正	65
4.1 射频频率调制	65
4.1.1 适合 RF FM 的 VCO 类型	65
4.1.2 LC VCO 的结构选择	66
4.1.3 RF FM 使用的 LC VCO 电路设计	67
4.2 射频中心频率校正及其设计考虑	69
4.3 中心频率校正的电路实现	71
4.3.1 系统框图	71
4.3.2 高频分频器	72
4.3.3 数字鉴频器	74
4.3.4 积分器	74
4.3.5 亚连续操作	75
4.3.6 时钟频率的选择	76
4.4 双通路射频压控振荡器	76
4.5 测试结果	77

4.5.1 高 β_{RF} 下的测试结果	79
4.5.2 低 β_{RF} 下的测试结果	80
4.6 本章小结	82
第5章 宽带射频鉴频器及子载波处理	83
5.1 常用的宽带射频鉴频器架构	83
5.1.1 可再生结构	83
5.1.2 延时相乘结构	84
5.2 宽带射频鉴频器的电路实现	86
5.2.1 基于双带通滤波器的鉴频电路	86
5.2.2 基于模拟相位内插型延迟线的鉴频电路	89
5.3 子载波处理的架构设计	92
5.3.1 四路过零点检测型 SCP	92
5.3.2 单路过零点检测型 SCP	92
5.4 子载波处理的电路实现	94
5.4.1 抗混叠滤波器	94
5.4.2 下变频器	95
5.4.3 低通滤波器	96
5.4.4 限幅器	99
5.4.5 数字 FSK 解调	99
5.5 测试结果	100
5.6 本章小结	103
第6章 FM-UWB 收发机的射频前端、天线及系统测试	105
6.1 发射端的输出放大器	105
6.2 接收端的预放大器	106
6.2.1 预放大器电路	106
6.2.2 预放大器噪声分析	109
6.3 射频前端寄生效应及封装模型	110
6.4 UWB 天线	112
6.5 收发机的测试方案	113
6.6 收发机的测试结果	115
6.7 收发机的链路预算	117
6.8 本章小结	119

第7章 FM-UWB 收发机的功耗优化及实现	121
7.1 收发机功耗优化的可行性分析	121
7.2 基于数据边沿检测触发的动态功耗优化方法	122
7.3 动态功耗优化方法在收发机系统中的设计实现	124
7.4 功耗优化型收发机的设计实例	127
7.5 测试结果	128
7.6 本章小结	133
第8章 FM-UWB 发射机的另类实现	135
8.1 基于电流型子载波的发射机结构	135
8.2 基于电流型子载波的发射机实现	137
8.2.1 电流型子载波生成	137
8.2.2 电流型射频频率调制	138
8.2.3 基于 AFC 的频率校正	139
8.2.4 输出放大器	140
8.3 本章小结	141
参考文献	143

第 1 章

FM-UWB 的应用及优势

1.1 超宽带技术

联邦通信委员会 (Federal Communications Commission, FCC) 定义凡满足下面任一条件的信号即为超宽带 (Ultra Wideband, UWB)^[1] 信号:

- (1) 信号带宽大于载波频率的 0.2 倍, 即相对带宽大于 0.2;
- (2) 信号 (绝对) 带宽大于 500 MHz。

式 (1-1) 给出了相对带宽 (BW_R) 和绝对带宽 (BW_A) 的计算公式; 其中, f_H 和 f_L 分别是 UWB 信号的功率谱密度衰减 10 dB 时对应的上限频率和下限频率。图 1-1 给出了 UWB 信号与窄带信号的带宽比较; 可见,

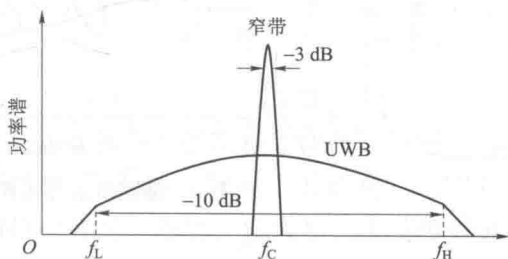


图 1-1 超宽带和窄带信号的带宽比较^[1]

UWB 信号的带宽不同于窄带信号所定义的 -3 dB 带宽, 而是 -10 dB 带宽。

$$BW_A = f_H - f_L, \quad BW_R = \frac{f_H - f_L}{0.5(f_H + f_L)} \quad (1-1)$$

图 1-2 给出了当前常用的无线通信技术的频带分布。FCC 把 3.1~10.6 GHz 范围的频带划分给民用 UWB 使用；UWB 信号的频带覆盖了现有的窄带无线通信系统，为了不干扰窄带通信，需要限制 UWB 的发射功率。图 1-3 给出了 FCC 制定的 UWB 信号在发射（辐射）功率上的限制，即 UWB 信号的频谱掩膜^[2]。与其他无线通信技术相比，UWB 的发射（辐射）功率相当的低（小于 100 μ W 或 -10 dBm），功率谱密度（PSD）低于 -41.3 dBm/Hz。

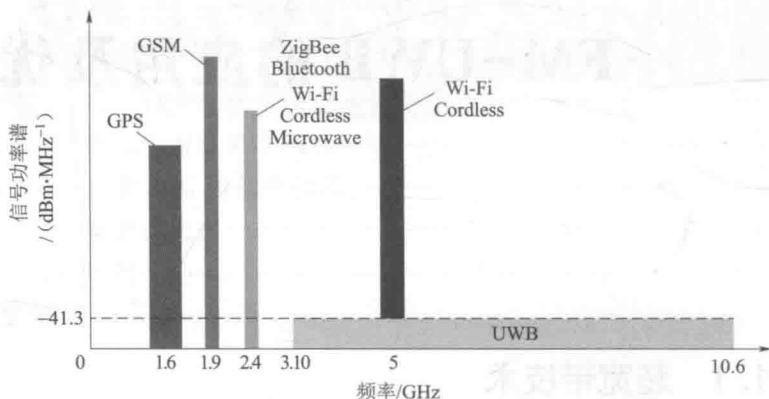


图 1-2 常用的无线通信技术的频带分布

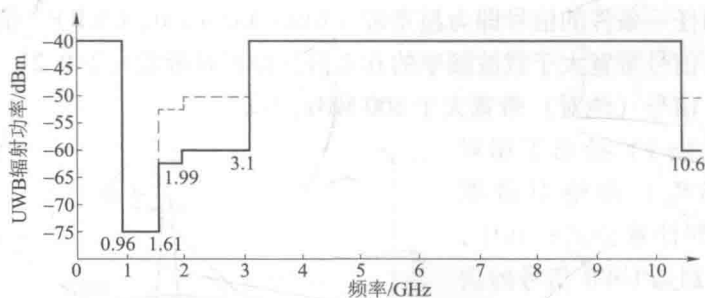


图 1-3 超宽带信号的频谱掩膜^[2]

1.2 UWB 的分类

UWB 信号的产生方法有很多种，这里给出近年来在半导体顶尖会议

(IEEE International Solid-State Circuits Conference, ISSCC) 和杂志 (IEEE Journal of Solid-State Circuits, JSSC) 上出现的比较多的五种 UWB 技术。

(1) MB-OFDM^[3], 多频带正交频分复用: 多频带 (MB) 技术和正交频分复用 (OFDM) 技术联合使用以实现超宽带, 采用多频带方案粗分很宽的频带, 而 OFDM 细分频带; 通过多个子频带来实现大带宽的动态分配, 数据在每个子频带上采用时-频交织正交频分复用 (TFI-OFDM) 的方式进行传输。

例如 3.1 ~ 10.6 GHz 的 UWB 频带通过多频带技术, 粗分为多个子频带, 每个子频带有 528 MHz 的带宽, 用来传输基于 128 个点 OFDM 调制的数据, 则每个子载波只需占用 4 MHz 的带宽。也就是说, 借助 MB 和 OFDM 混合技术, 可将窄带信号转换成 UWB 信号。

(2) DS-CDMA^[4], 直接序列码分多址: 将携带数据信息的窄带信号 (信息码元) 与高速地址码信号 (扩频码) 相乘而生成宽带扩频信号; 以信息码元为基础, 以 M 元双正交键控 (MBOK) 码作为扩频码, 即作为 CDMA 的编码类型, 对每一码元进行 MBOK 编码以实现频谱扩展。

(3) IR-UWB^[5], 脉冲无线电超宽带: 根据时-频变换原理, 信号在时域的脉冲越窄, 则在频域的带宽越宽; 数据通过调制高阶高斯短时脉冲的物理参数 (如幅度、相位、位置等) 产生 UWB 信号。

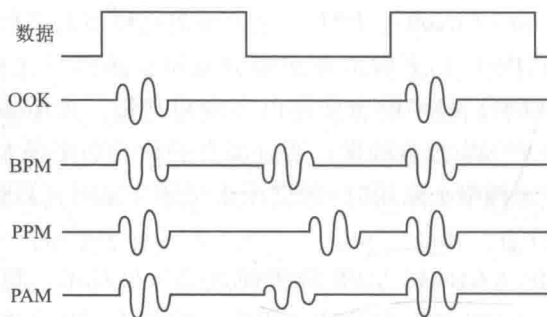
(4) FM-UWB^[6], 超宽带调频: 借助双调频技术 FSK+FM, 将数据映射成频率不同的三角波信号, 再基于三角波幅值直接进行射频调频, 利用后者的大射频调制因子, 实现频带拓展并产生 UWB 信号。

(5) Chirp-UWB^[7], 线性调频超宽带: IR-UWB 和 FM-UWB 的混合体, 系统沿用 IR-UWB 的脉冲间歇工作模式, 但脉冲内部采用 FM-UWB 中利用频率调制实现超宽带频谱的思路。

1.2.1 IR-UWB

IR-UWB 的脉冲调制方式主要有脉冲二进制相位调制 (BPM)、脉冲开关调制 (OOK)、脉冲幅度调制 (PAM)、脉冲位置调制 (PPM) 等, 分别用短时高阶高斯脉冲的相位、有无、幅度、位置来代表基带数据^[8], 如图 1-4 所示。

IR-UWB 通常有低至 1% 的占空比, 产生的脉冲宽度很窄。如此窄的脉冲波形在时间和空间上具有高分辨率, 所以 IR-UWB 具有高精度的测距和定位能力。

图 1-4 IR-UWB 的信号波形^[8]

IR-UWB 低占空比的好处是通过间歇工作可节省系统功耗；但极窄的脉冲宽度会使接收机在位同步时产生困难，因为要想对如此短时的脉冲在时域上定位是相当有挑战的。另外，在同等功率谱密度约束的条件下，IR-UWB 具有较高的输出峰值电压，这对于低电压的 CMOS 器件来说是不易实现的^[9]。此外，其峰值与平均功率的比值较高，超宽带天线不易设计。而且，其频谱旁瓣较多，射频带宽难以控制。

1.2.2 FM-UWB

FM-UWB 运用双调频技术^[10, 11]：基带数据“0”和“1”经过 2 元频移键控（2-FSK）转换成频率分别为 f_1 和 f_2 的模拟三角波序列，这一过程叫子载波生成；随后模拟三角波送到射频压控振荡器（VCO）的电压控制端，在 VCO 的幅度-频率转换增益的操作下，产生载波频率随三角波子载波幅度变化的恒包络信号，即 UWB 信号，这一过程叫作射频调频（RF-FM）。

图 1-5 给出了 FM-UWB 信号的时域波形及频谱特征。恒包络的频谱特点是频谱形状理想，有平坦的频谱通带特性和陡峭的频谱滚降（roll-off）特性，因而射频带宽容易控制；另外，在同等功率谱密度约束的条件下，FM-UWB 具有较小的输出峰值电压，其峰值与平均功率的比值较低，因此其超宽带天线更容易设计。但 FM-UWB 缺乏占空比的操作，使得载波需要连续传输，即射频大电流模块需要持续工作，难以实现系统功耗最优化。

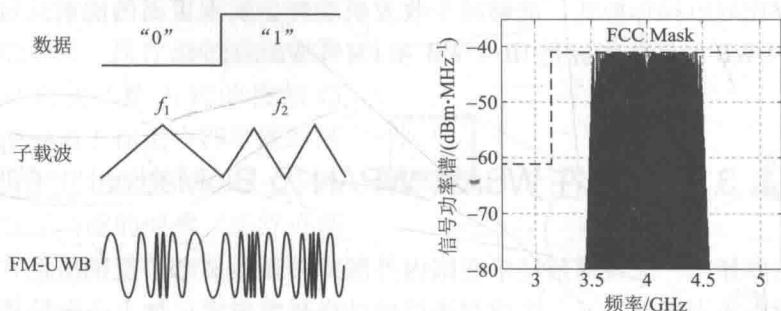


图 1-5 FM-UWB 的信号波形及频谱特征

1.2.3 Chirp-UWB

为了整合 IR-UWB 和 FM-UWB 各自的特点与优势,人们提出了 Chirp-UWB^[7,9] 技术。如图 1-6 所示, Chirp-UWB 沿用了 IR-UWB 的间歇工作模式以降低系统功耗,但其占空比(诸如 10%)较之 IR-UWB 的占空比(小于 1%)要宽松很多;而在每个脉冲内部,都采用了 FM-UWB 中利用频率调制实现超宽带频谱的思想,使用一个下降的 Chirp(如频率从

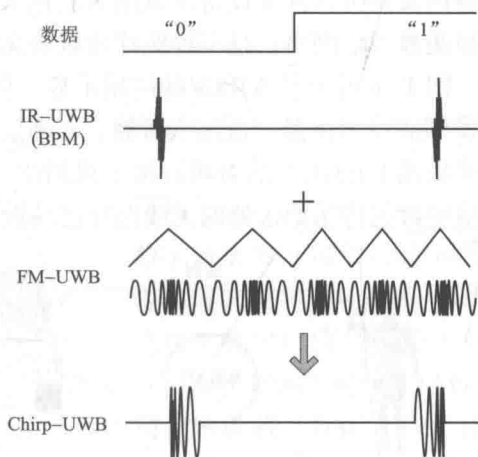


图 1-6 Chirp-UWB 的工作原理

4 GHz 降低至 3.75 GHz) 表示数据“0”, 用一个上升的 Chirp(如频率从 4 GHz 上升至 4.25 GHz) 代表“1”。Chirp-UWB 信号相当于 FM-UWB 信号在每比特周期内截取了一小段, 只不过数据“1”对应截取的是频率上升段, 数据“0”对应截取的是频率下降段。

也就是说, Chirp-UWB 在电路实现细节上类似于 FM-UWB, 但在系统级操作模式上类似于 IR-UWB。相比于 IR-UWB, Chirp-UWB 宽松的占空比不仅降低输出脉冲的峰-峰值电压, 有利于低电压 CMOS 工艺下的电路设计, 而且具有较大的脉冲宽度, 有利于接收端的脉冲同步处理。相比于 FM-UWB 收发机射频前端大电流模块的持续工作, Chirp-UWB 射频前端

的占空比间歇操作模式,能够减少收发机功耗,实现更高的能效。可以说 Chirp-UWB 的性能指标是 IR-UWB 和 FM-UWB 的折中。

1.3 UWB 在 WBAN/WPAN 及 BioMedical 上的应用

近些年来,无线通信技术在国内外医疗领域中有着广泛的应用,无线医疗设备应用发展迅速,医疗和通信的结合越发紧密;加上各种便携式无线设备的涌现,以及传感器技术的发展,人们开始把目光转移到以人为中心的小型网络。在此背景下,无线体域网^[12] (Wireless Body Area Network, WBAN) 应运而生。WBAN 是将数个放置在人体不同部位、功能不同的传感器以及便携式移动设备组成用于监控人的身体情况或提供其他无线应用的短距离通信网络,是一种医疗领域的无线应用。

图 1-7 给出了 WBAN 的应用示意。借助多型传感器,人体不同部位的生理特征(如体温、血压、血糖、心率、心电等)信息,通过 WBAN 传递到手机或 PAD 上,后者再通过手机网络(如 GSM、GPRS)或互联网将这些生理数据传送到远处的无线医疗终端设备上,供医生进行查询和诊断。

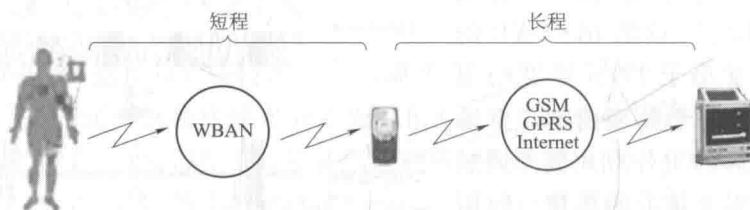


图 1-7 无线体域网的应用示意

随着智能家居、智能终端、智能环境的快速发展,用户各种外围设备逐渐增多,为了在有限多变的小范围办公和家居环境中,短距离、低成本、低功耗地实现多种设备间的无线无缝连接并进行信息共享,无线个人网^[13] (Wireless Personal Area Network, WPAN) 应运而生。

图 1-8 给出了 WPAN 的应用示意。围绕人体 10 m 范围内的各种无线终端,如便携式计算机、智能手机、智能电话、无线打印机、无线耳机等通过 WPAN 进行无线数据连接,实现信息共享互通。

全球人口老龄化现象日趋严重,慢性病的威胁和困扰日益增多,这些

对医疗设备提出了可家用监护和护理的要求。医疗设备呈现便携式、穿戴式、植入式的发展趋势,使得患者在家中即可随时随地进行护理、诊断和治疗。带有无线收发功能的便携式医疗终端设备在家庭中进行体征信息的实时跟踪与检测,然后借助物联网或移动互联网远距离通信,实现医生对患者或者亚健康病人的实时诊断与健康提醒。这些都无疑推动了生物医疗电子的发展。

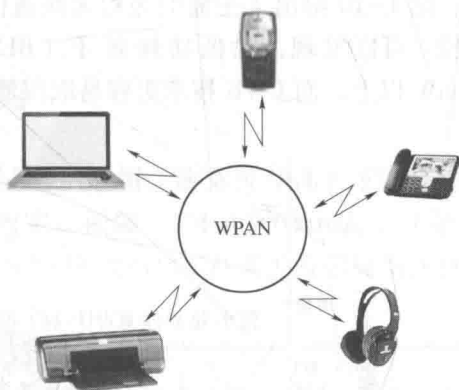


图 1-8 无线个人网的应用示意

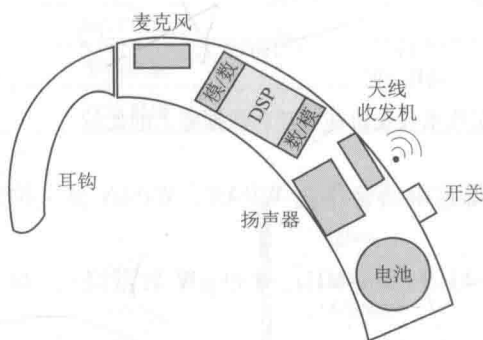


图 1-9 生物医疗电子系统的一个典型应用示例——无线助听器^[14]

图 1-9 给出了生物医疗 (BioMedical) 电子系统的一个典型应用示例——无线助听器。麦克风将进入耳道的声音信号转换为模拟电信号,再经模拟/数字转换器 (ADC) 得到数字电信号,数字信号处理 (DSP) 模块对数字电信号进行信号放大、噪声抑制等处理,经数字/模拟转换器 (DAC) 产生模拟电信号,最后由扬声器转换为

声音信号来刺激鼓膜,产生听觉。无线通信模块集成射频收发机,实现耳间通信或与外在的音频源(如手机、电视、MP3 等)进行通信,满足使用者接听电话、享受多媒体信息的要求^[14]。

上面阐述的 WBAN、WPAN 及生物医疗电子系统均需要无线通信技术或无线收发机,且要求它们具备短距离、低功耗、低成本特性,而对数据率不做任何要求。相比于常用的 Wi-Fi、Bluetooth、ZigBee、IrDA、RFID 等窄带无线通信技术,UWB 技术虽然牺牲了频谱利用率,但系统在调制与解调过程中对频率精准性的要求降低,因此可以采用更简单的收发机架构,实现较低的功耗。

基于最近几年半导体、微电子领域顶尖会议和顶级期刊公开发表的论

文, 图 1-10 给出了主流的短程无线通信技术收发机在功耗和数据率上的比较。可以发现, 除低功耗蓝牙 (BLE) 外, 窄带技术的功耗普遍在 10 mW 以上, 而 UWB 技术更容易取得低于 5 mW 的功耗。

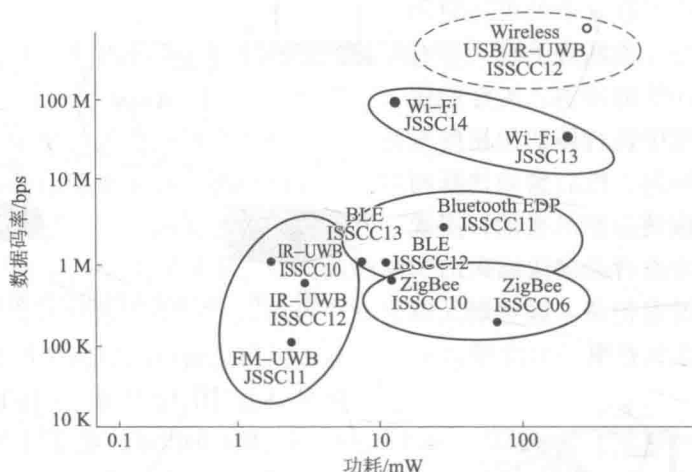


图 1-10 主流的短程无线通信技术收发机在功耗和数据率上的比较

UWB 所具有的下述特点, 使得它很适合作为 WBAN、WPAN 及生物医疗电子系统的通信技术^[15, 16]。

(1) 极低的电磁辐射功率 (-41.3 dBm/MHz, $100 \mu\text{W}$ 数量级), 对人体细胞组织无伤害。

(2) 接收机不需要射频本振 (LO), 收发机架构简单。

(3) 低功耗 (功耗小于 5 mW), 系统续航时间久。

(4) 波长短, 穿透性强, 适合体内体外或狭小空间通信。

(5) 发射功率低, 信号不容易被侦听, 个人隐私保密。

(6) 抑制窄带干扰和多路衰减。

(7) 能与其他窄带通信技术共存。

因此, IEEE 802.15 工作组把 UWB 列为 WPAN 使用的三大通信技术之一 (另两个是 Bluetooth 和 ZigBee); IEEE 802.15.6 小组已经把 UWB 列为 WBAN 通信技术的强有力竞争者。欧洲信息通信技术的 MELODY 和信息科学技术的 MAGNET 这两个大型项目都是针对 UWB 在 WBAN/WPAN 中的应用的。