

BIOMEDICAL ELECTRONICS SYSTEMS:
ENERGY HARVESTING AND WIRELESS DATA TRANSMISSION



生物医疗电子系统： 能量注入与无线数据传输

周波 陈霏 著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

生物医疗电子系统：能量 注入与无线数据传输

周 波 陈 霏 著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

生物医疗电子系统: 能量注入与无线数据传输/周波, 陈霏著. —北京: 北京理工大学出版社, 2015. 6

ISBN 978 - 7 - 5682 - 0536 - 8

I. ①生… II. ①周… ②陈… III. ①生物工程 - 医学工程 - 电子系统
IV. ①R318. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 083051 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 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 13.5

字 数 / 200 千字

版 次 / 2015 年 6 月第 1 版 2015 年 6 月第 1 次印刷

定 价 / 52.00 元

责任编辑 / 陈莉华

文案编辑 / 陈莉华

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

序

十多年前一次偶然的机会，从报纸上看到国家亟须集成电路人才的信息，便毅然将模拟、射频集成电路设计作为此后的科研方向。一路走来，经历颇多挫折和困惑，但也得到同行和导师的悉心指导。清华大学读博期间，进入医疗微电子和射频集成电路领域；美国访学期间，从事生物监测微电子系统研发；硕士阶段和工作期间，在模数转换、电源和收发机方面亦积累了设计经验。

吾辈是知识的接收者和受益者，也愿当知识的传播者和创造者。编者有心把近年来的所学、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；三是回报社会，感谢同行和导师在科研和学术上的无私栽培。

近年及可预见的未来，生物医疗电子系统已然成为研发热点，

并给集成电路设计者搭建了巨大的施展才华的舞台。生物医疗电子系统主要由传感器、模数/数模转换、数字处理与控制、无线收发机、供能模块（能量注入）等组成。编者的研发经历与这些领域颇有交集，遂决定动笔写这本书，系统梳理近年来的研究心得。

本书关注生物医疗电子系统两方面的应用：人体医疗诊断和健康护理、生物行为和环境监测。本书强调该系统两大核心模块的设计：能量传输、无线数据收发。本书给出了多种能量注入实现方式、多款主流的短程无线通信收发机的设计实例，并阐述了众多模拟和射频模块的结构和电路实现。本书给出的收发机架构注重低功耗、低成本、数字化实现。

全书共8章，第1章介绍生物医疗电子系统，第2章讨论低功耗近程无线通信技术及收发机架构，第3章介绍能量注入模式及实现，第4~6章阐述三种超宽带收发机的设计及应用，第7~8章介绍 ZigBee、WiFi、Bluetooth 发射机及应用。

本书专业性和实用性强，兼顾工程应用和科研创新。本书自成体系，便于自学，主要面向模拟、射频集成电路从业人员，包括微电子学专业的在校研究生和半导体企业的研发工程师。

本书在写作过程中，得到了清华大学王志华教授和 Woogeun Rhee 教授、美国俄勒冈州立大学 Patrick Chiang 教授和 Arun Natarajan 教授的悉心指导。此外，清华大学孙天佳博士、俄勒冈州立大学康健博士也给出了宝贵的修改意见。本书的相关科研工作及出版发行，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，吾辈的任何科研成果都离不开她们精神上的鼓励。谨以此书送给吴园妹、马月婷女士，及可爱的孩子周岸芷、陈若清。

限于编者水平，书中难免存在不妥和错误之处，欢迎读者批评指正。

编 者

2015 年 1 月

目 录

第 1 章 生物医疗电子系统简介	1
1.1 背景及概念	1
1.2 产品及应用	3
1.2.1 无线助听器	4
1.2.2 无线胶囊内窥镜	5
1.2.3 青光眼、颅血压智能治疗仪	6
1.2.4 微小动物跟踪定位	7
1.2.5 农业生产环境监控	8
1.2.6 紫外线、心电图测量仪	9
1.3 系统架构	10
1.4 半导体行业的机遇和挑战	11
1.5 本书内容安排	12
第 2 章 低功耗近程无线通信技术及收发机架构	17
2.1 窄带无线通信技术简介	17

2.1.1	蓝牙	18
2.1.2	WiFi	19
2.1.3	ZigBee	20
2.1.4	IrDA	21
2.1.5	RFID	22
2.2	超宽带无线通信技术简介	23
2.2.1	IR - UWB	25
2.2.2	FM - UWB	26
2.2.3	IR - UWB 与 FM - UWB 的技术比较	27
2.2.4	Chirp - UWB	28
2.3	无线通信收发机架构	29
2.3.1	窄带发射机架构	29
2.3.2	窄带接收机架构	32
2.3.3	超宽带发射机架构	35
2.3.4	超宽带接收机架构	36
2.3.5	窄带和超宽带收发机的比较	42
2.4	无线通信技术的比较	42
2.5	无线通信技术在生物医疗电子系统中的应用	44
2.6	无线能量和无线数据传输的示例——无源 RFID 技术实现	46
2.7	不同无线通信收发机在本书内容上的体现	49
第3章	能量注入模式及实现	51
3.1	直流电能的产生模式	51
3.2	适合于生物医疗电子系统的供能模式	55
3.3	无线供能	57
3.3.1	感应耦合式无线能量传输	62
3.3.2	电磁波无线能量传输	65
3.4	光伏发电	69
3.5	间歇工作模式下的设计考虑	71
第4章	用于生物跟踪定位的 IR - UWB 发射机	73
4.1	短时高斯脉冲与 UWB 频谱的对应关系	73

4.2 IR-UWB 发射机核心模块——脉冲生成器	74
4.2.1 模拟脉冲生成器	74
4.2.2 数字脉冲生成器	76
4.2.3 BPM 和 OOK 型数字脉冲生成器	77
4.3 多相时钟生成	80
4.3.1 环形振荡器	80
4.3.2 注入锁定型环形振荡器	81
4.3.3 D 触发器或二分频器阵列	82
4.3.4 DLL 型延迟线	83
4.4 IR-UWB 系统参数考虑	85
4.5 生物跟踪定位电子系统的设计示例	86
第5章 用于 WBAN 通信的 FM-UWB 收发机	95
5.1 FM-UWB 收发机架构	95
5.2 FM-UWB 收发机模块实现	97
5.2.1 子载波生成	97
5.2.2 射频频率调制和中心频率校正	102
5.2.3 宽带 FM 解调	106
5.2.4 子载波处理	107
5.2.5 低功耗、低成本设计考虑	109
5.3 FM-UWB 收发机系统考虑	109
5.4 低功耗 FM-UWB 收发机设计示例	111
5.5 FM-UWB 收发机的测试结果	117
第6章 用于无线助听器的 Chirp-UWB 收发机	121
6.1 Chirp-UWB 技术原理	122
6.2 Chirp-UWB 的接收同步	123
6.3 Chirp-UWB 系统架构	125
6.3.1 收发机结构	125
6.3.2 Chirp 脉冲的扫频分辨率和扫频步数	127
6.3.3 接收端 FSK 解调	127
6.4 Chirp-UWB 收发机的电路实现	129

6.4.1	梯度发生器	129
6.4.2	数字控制型振荡器	131
6.4.3	功率放大器	133
6.4.4	低噪声放大器	133
6.4.5	宽带 FSK 解调	134
6.5	Chirp - UWB 收发机的测试结果	136
6.6	Chirp - UWB 在无线助听器中的应用示例	138
第7章 用于生物环境监测的 ZigBee/WiFi 发射机		143
7.1	生物环境监测电子系统架构	143
7.2	关键模块的电路设计	146
7.2.1	无线数据传输	146
7.2.2	四相载波生成	148
7.2.3	PLL 子模块实现	150
7.2.4	带隙基准、LDO 稳压器电路	152
7.2.5	晶振、上电复位电路	154
7.3	锁相环的快开启实现	156
7.3.1	动态环路带宽技术	157
7.3.2	频率预设置技术	158
7.3.3	Dynamic BW + Pre - setting 混合技术	160
7.3.4	两点调谐技术	161
7.3.5	锁定识别与模式切换	162
7.4	Fast - Settling PLL 设计示例	164
7.5	功放的低电源电压设计考虑	166
第8章 用于医疗电子的 Bluetooth 发射机及低载频发射机		169
8.1	现有的全数字发射机架构	169
8.1.1	基于 ADPLL 和 DPA 的发射机	169
8.1.2	基于极坐标中频脉宽调制的发射机	171
8.1.3	基于 Out - Phasing 相位插值的发射机	172
8.1.4	基于数字正交上变频的发射机	173

8.1.5 基于载频脉宽调制的发射机	174
8.2 蓝牙发射机的全数字实现	177
8.2.1 基于相位插值器的全数字蓝牙发射机	177
8.2.2 基于延迟选择器的全数字蓝牙发射机	179
8.2.3 基于正交中频 PWM 的全数字蓝牙发射机	182
8.3 低载频发射机的全数字实现	185
8.4 全数字发射机的仿真结果	186
参考文献	189

生物医疗电子系统简介

1.1 背景及概念

近些年来，随着生活水平的不断提高，人们对医疗、健康、疾病护理的需求和对生活品质的追求等方面的愿望越来越强烈。而传统的医学治疗技术和生物监控技术已经不能满足当下人们对舒适度和便捷度的需求。同时，高新领域电子技术的快速发展，使疾病护理治疗和生物监控手段越来越先进。在此背景下，生物医疗电子系统应运而生，使医疗产品和生物监测突破了以往观念的约束和限制，在信息化、微型化、实用化等方面得到了长足发展^[1]。

首先，全球人口老龄化现象越来越严重，以及慢性病的威胁

和困扰日益扩大，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诊断和治疗，而不用频繁去医院。在可预见的未来，个人监护、诊断以及运动状态监测等医疗设备会逐渐步入家庭和个人应用场合。

图 1-1 给出了一款生物医疗电子系统的应用实例（无线运动鞋）。鞋底传感器采集人运动的数据（如步速、步长等），并通过发射机把数据无线发送给手臂上的接收机，后者和 iPod 媒体播放器进行有线或无线蓝牙连接，接收这些数据并送到播放器中进行计算和显示。这样，人们在运动中就可以实时知道自己的运动数据。



图 1-1 生物医疗电子系统的应用实例（无线运动鞋）

其次，随着无线医疗设备的迅速发展，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，如无线体域网（Wireless Body Area Network, WBAN）。它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（如智能手机、PAD、移动电话等）组成用于监控人的身体情况或提供多种娱乐服务的短距离通信网络^[2]，将人体变成通信网络的一部分。

图 1-2 给出了 WBAN 的应用示意图。借助多型传感器和发

射机芯片，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。

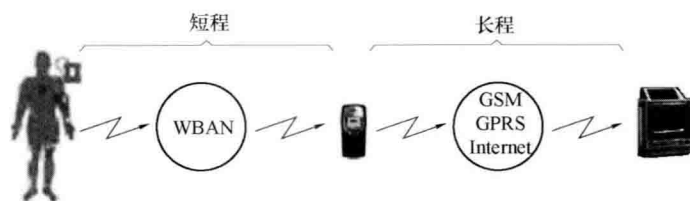


图 1-2 WBAN 的应用示意图

再次，物联网、云计算及移动互联网等新一代信息技术在医疗领域的应用逐渐走到前台，直接推动了生物医疗电子系统的发展。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，实现医院或医生对患者或者亚健康患者的实时诊断与健康提醒，从而有效地减少和控制病患的产生与发展。

此外，人们需要对农产品的成长环境（如温度、湿度、酸碱度、虫害等）、小型动物的行为（如蜜蜂的采蜜活动）、环境污染和天气情况（如雾霾）等进行长期或实时监控，并快速反馈这些信息。这些就需要在田地间、小型动物上、污染严重地区安装多种传感器采集各种所需的数据，并借助无线通信技术将采集处理后的数据发送到有关单位进行长期或实时监控。

1.2 产品及应用

近年来，人们推出众多生物医疗电子产品，如无线助听器、

电子血糖仪、电子血压计、无线胶囊内窥镜、人工视网膜、人工耳蜗、神经刺激器、无线运动鞋、智能护腕、紫外线检测仪、便携式心电图仪、便携式超声诊断仪等。正在研发的还有北医三院的青光眼智能治疗仪等。此外，农作物生长环境监控、微小动物行为跟踪、环境监测等也需要用到无线电子产品。下面简单介绍几种已推出或计划推出的产品及其应用。

1.2.1 无线助听器

助听器是为解决老年人常见的感音神经性及混合性听力损失问题而设计的无线电子设备，被越来越多的听力损失患者所接受。助听器对传入耳朵的声音进行放大的同时进行噪声抑制等语音增强处理，使听力损失患者能够正确识别听力正常人所接受音量的声音^[3]。

典型的无线助听器结构如图 1-3 所示。在信号通路中，麦克风将声音信号转换为模拟电信号，模拟/数字转换器（模/数转换器，ADC）将模拟电信号转换为数字电信号，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，数字/模拟转换器（数/模转换器，DAC）将处理后的数字电信号再转换为模拟电信号，最后由扬声器将模拟电信号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。信号处理与无线通信的能量均由安装在助听器腔体内的纽扣锌空气（Zinc - Air）电池提供。

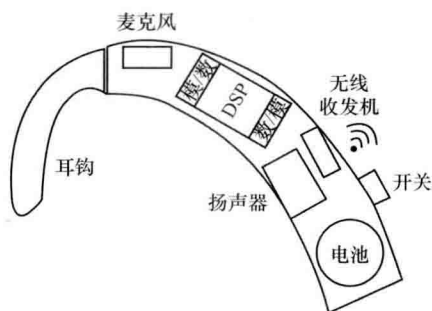


图 1-3 典型的无线助听器结构

1.2.2 无线胶囊内窥镜

对消化道疾病的检查，目前最常用和最直接有效的方法就是内窥镜检查，它在消化道疾病的诊断中起着极为重要的作用。但现有的内窥镜系统都不得不使用引导插管，给系统操作带来不便，同时给患者带来很大的痛苦，而且检查的部位受到限制，无法实现对小肠部分的检查。随着微电子和微机械（MEMS）技术的发展，人们开发出了无线内窥镜系统^[4]，如图1-4所示，它外表像一粒胶囊。在进行消化道疾病检查时，无须再插入很长的导管，只需吞服此类胶囊即可，检查时患者不再痛苦。

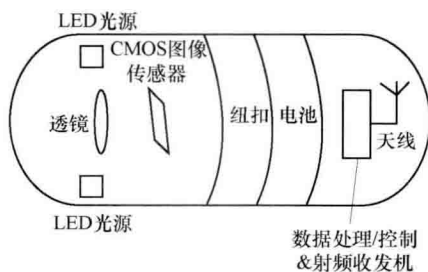


图 1-4 无线胶囊内窥镜

无线胶囊内窥镜主要由 CMOS 图像传感器、发光 LED、控制和数据处理模块、射频收发机、天线和电源组成。将消化道（如胃、肠）的真实情况进行拍照或采集，经过模/数转换后，得到数据并进行处理，然后通过发射机及天线传到体外的医疗终端上，供医生进行诊断。必要时，医生也可以从外部发出指令去控制胶囊。整个系统可由内部电池供电，也可以通过体外无线供电，即无线能量注入。而完成诊断任务后的胶囊可以顺着肠道排泄出来，对人体造成的危害或污染基本没有。

未来，微型化、集成化、智能化是电子胶囊系统的总体发展方向^[4]。微型化就是要缩小胶囊体积，使之能进入人体其他腔道如呼吸道、血管中诊断疑难病情；集成化就是将各种功能的电子胶囊集成为一体，这样吞服一颗就可以将消化道进行一次全面的体检和治疗，而不需要吞服多枚不同功能的电子胶囊；智能化就是让胶囊能够自动在消化道内行走，自动识别病变组织并主动施药或手术，即研制智能胶囊机器人。

1.2.3 青光眼、颅血压智能治疗仪

青光眼是眼内液压间断或持续升高的一种眼病，持续的高眼压可以给眼球各部分组织和视功能带来损害。如不及时治疗，视力会全部丧失而致失明。青光眼是导致人类失明的三大致盲眼病之一。而现有治疗青光眼常用的手段是外科手术，通过释放部分眼内液体从而起到控制眼压的目的。但手术只是暂时有效，而无法保证术后长久地控制眼压，患者往往在经历多次手术痛苦和风险后，仍无法彻底摆脱青光眼病。在此背景下，北医三院的专家们开始研究能植入眼球表面的青光眼智能治疗系统或芯片^[5]。

图 1-5 给出了青光眼智能治疗系统的一般架构，由液压传