

无线单片机技术丛书



nRF 无线SOC单片机 原理与高级应用

谭 晖 编著



北京航空航天大学出版社

无线单片机技术丛书

nRF 无线 SOC 单片机 原理与高级应用

谭晖 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书介绍 nRF 系列射频 SOC 原理与应用,详细介绍 nRF 射频 SOC 各部分功能部件的原理与应用,并为每个功能模块编写了应用演示源程序,以便于快速实验及测试。此外还介绍开发环境的建立,以及 nRF SOC 教学开发实验平台,最后以应用为背景介绍射频有源 RFID、无线 USB,以及 2.4 GHz 无线鼠标、无线键盘和无线遥控器等的设计。

本书以实践出发,以应用为目标,可作为个人、学生、无线爱好者、工程师学习无线设计的入门及提高读物,或作为高等院校的计算机、电子、自动化、无线通信等专业相关课程的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

nRF 无线 SOC 单片机原理与高级应用/谭晖编著. —北京:
北京航空航天大学出版社,2009.9
ISBN 978-7-81124-915-6

I. n… II. 谭… III. 单片微型计算机 IV. TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 168418 号.

© 2009,北京航空航天大学出版社,版权所有。

未经本书出版者书面许可,任何单位和个人不得以任何形式抄袭、复制本书部分或全部内容。
违者必究。

nRF 无线 SOC 单片机原理与高级应用

谭 晖 编著

责任编辑 李宗华 李开先 刘秉和

*

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(100191) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhpress@263.net

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本: 787×960 1/16 印张: 32.25 字数: 722 千字

2009 年 9 月第 1 版 2009 年 9 月第 1 次印刷 印数: 3000 册

ISBN 978-7-81124-915-6 定价: 56.00 元

序 言

技术的发展使得无线设计更为简单,但在设计超低功耗无线产品或应用时,要达到良好的效果,仍然需要具备一定的基础和技术方面的知识,这就是本书希望达到的目的。

超低功耗无线产品(简称 ULP)是指一个无线产品采用电池供电时(电池类型包括 AA 电池到纽扣电池)可以长时间工作(从数月到数年,取决于工作的类型及占空比)。

本书介绍了 Nordic 公司最新的超低功耗 2.4 GHz 无线收发 SOC 及其应用,将带领你由基本开始,到高级的应用设计。

Nordic SOC 采用的是专有通信方式,可与 Nordic 的无线产品相互间通信。如果需要考虑不同厂家间产品的兼容性,则需要选择一些标准的产品诸如蓝牙等,但互通性(不同厂家蓝牙间兼容工作的能力)可能需要以性能、功耗、或成本等换取。

Nordic 的专有 SOC 产品,在距离、带宽、可靠性和电源功耗等方面进行了综合优化,在超低功耗无线方案成本方面的表现也是领先的。今天这些 Nordic 无线 SOC 产品已经在中国及其他市场发运了数百万片以上。例如,大多数非蓝牙的无线 PC 键盘/鼠标都选用了 Nordic 的 2.4 GHz 产品,其极高的性价比已经成为替代 27 MHz 技术的有力竞争者。

Nordic 无线 SOC 目前包括 nRF24LE1——集成了高性能 Flash 51 内核单片机,以及 nRF24LU1+——集成了 USB2.0 控制器可用于无线外设 PC 周边的应用。同时还有一组全范围的开发工具用于这些无线 SOC 产品,使得开发更为简单、高效。这些工具包括 nRFGO 仿真器和开发板,它提供了用户评估和开发 Nordic 无线 SOC 所需的所有条件;加上容易进行客户定制的 Gazell 射频协议栈,以及生产就绪的 nRFready 参考设计。

我们希望你能够喜爱这本书并发现这是一个有价值的参考,Nordic 也欢迎任何的建议及反馈。

Ståle ("Steel") Ytterdal 叶钢

Nordic Semiconductor 亚太区市场及销售总监

Email: steel.ytterdal@nordicsemi.no

Tel: +852 3965 3230

Nordic Semiconductor

66/F, The Center

99 Queen's Road Central, Central

Hong Kong



前言

本书介绍 nRF 系列射频 SOC。一直以来,单片机和无线在不少技术人员的心目中仍然是相隔比较远的不同应用。而实际上,随着无线应用的推广和普及,单片机无线化,或者说无线单片机化,已经成为令人关注的热点,无线与单片机的结合进一步拓展了应用和创新的空间。来自北欧挪威的 Nordic Semiconductor ASA 是无线中短距离业界的一朵奇葩,维京人的创新和奇思妙想体现在了射频芯片的设计上,nRF 系列射频芯片以超低功耗、高标准 RF 性能、易使用而著称,具有很高的市场占有率。Nordic 产品的很多功能设计和使用,特别是从使用者的便利角度出发,不需要做复杂的配置和操作,初次使用很容易理解及上手;Nordic 产品的超低功耗性能成为了业界的标杆,这也是 Nordic 产品非常重要的特点,这意味便携产品的电池使用寿命可以更长,更环保和节能;Nordic 射频芯片的 RF 性能也是非常优异的,用射频芯片设计无线产品,除了实现无线的功能外,更重要的是要满足对 RF 谐波等指标的要求,各国如美国 FCC,欧盟 CE 等对射频产品有严格的安规要求,采用射频芯片设计的产品必须进行相关的测试认证方可进入市场,采用 nRF 可以很容易完成这些认证过程。

对大多数没有使用过射频芯片的开发人员来说,无线是一门神秘的“黑箱技术”,往往不得其门而入。Nordic 新推出的系列单芯片射频 SOC,集成了 Flash 单片机和高性能无线收发引擎及相关协议链路层处理甚至 USB2.0,给广大技术人员和开发者一个全新的选择,只要具备单片机的基础,开发无线就可以如同开发单片机一样简单方便;对无线收发的控制通过对相关寄存器进行简单的操作即可完成;同时集成了校验、自动应答、丢包自动重发等在无线通信中非常有用的硬件链路层功能,编程调试在广大技术人员熟悉的 Keil C 环境中进行。

无线射频应用是一门实践性很强的技术,但是也有一定的规律可循。本书详细介绍 nRF 射频 SOC 的各部分功能部件的原理与应用,并为每个功能模块编写了应用演示源程序,便于快速实验及测试;此外还介绍开发环境的建立,以及 nRF SOC 教学开发实验平台;最后以应用为背景介绍射频有源 RFID、无线 USB,以及 2.4 GHz 无线鼠标、无线键盘、无线遥控器等的设计。本书主要目的是帮助技术人员快速学习及入门 nRF 无线 SOC,理解和认识无线概念,破除对无线应用的“未知”或“畏惧”心理,在短时间内,高质量开发出符合要求的无线产品。

为了方便广大读者学习和交流,可以访问网站 <http://www.freqchina.com>。同时如果读者对本书学习中所用到的器件和开发工具等设备感兴趣,也可以访问该网站查看购买方式。

在此感谢 Nordic 公司对本书出版的支持, Nordic 是一家极具特点的公司, 其做事的严谨、对产品的前瞻性以及和技术发展的把握令人钦佩。感谢 Nordic 公司亚太区市场及销售总监 Steel, 亚太区域销售经理 Chan Chim 长期以来的大力支持和热心帮助, 我们也忘不了 Nordic 公司亚太区技术团队 Kjartan, John, Salas 等的支持与协助, 并提供了建设性的意见和参考资料。

由于编者水平有限, 书中的错误及不足之处在所难免, 请读者及专家指正。

谭 晖

2009 年 7 月

目 录

第 1 章 2.4 GHz 无线 SOC 芯片 nRF24LE1

1.1	nRF24LE1 介绍	1
1.1.1	nRF24LE1 特性	1
1.1.2	nRF24LE1 应用领域	2
1.2	nRF24LE1 功能概述	2
1.2.1	nRF24LE1 主要功能	2
1.2.2	nRF24LE1 内部框图	5
1.2.3	nRF24LE1 引脚分配	6
1.2.4	nRF24LE1 引脚功能	7
1.3	nRF24LE1 射频收/发	8
1.3.1	射频收/发特性	8
1.3.2	射频收/发内部框图	9
1.3.3	射频收/发功能说明	10
1.3.4	增强型 ShockBurst	14
1.3.5	射频收/发的数据和控制接口	33
1.3.6	寄存器图	37
1.4	MCU	44
1.4.1	MCU 内部框图	45
1.4.2	MCU 特性	45
1.4.3	MCU 功能说明	47
1.5	存储器和 I/O 结构	55
1.5.1	PDATA 页式存储器存储地址	56
1.5.2	MCU 特殊功能寄存器	56
1.6	Flash 存储器	64
1.6.1	Flash 存储器特性	64
1.6.2	Flash 存储器内部框图	64
1.6.3	Flash 存储器功能说明	64
1.7	随机存储器 (RAM)	76

1.8 定时器/计数器	78
1.8.1 定时器/计数器特性	78
1.8.2 定时器/计数器内部框图	78
1.8.3 定时器/计数器功能说明	79
1.8.4 SFR 寄存器	83
1.8.5 实时钟 RTC	87
1.9 中 断	89
1.9.1 中断特性	90
1.9.2 中断控制器框图	90
1.9.3 中断功能说明	91
1.9.4 特殊寄存器	92
1.10 看门狗	94
1.10.1 看门狗功能	94
1.10.2 看门狗内部框图	94
1.10.3 看门狗寄存器功能说明	95
1.11 功耗和时钟管理	96
1.11.1 功耗和时钟管理内部框图	96
1.11.2 功耗和时钟管理工作模式	97
1.11.3 功耗和时钟管理功能说明	99
1.12 电源管理	105
1.12.1 电源管理特性	105
1.12.2 电源管理框图	105
1.12.3 电源管理功能说明	106
1.12.4 电源管理特殊功能寄存器 POFCON	107
1.13 片上振荡器	108
1.13.1 片上振荡器特性	108
1.13.2 片上振荡器框图	108
1.13.3 片上振荡器功能说明	109
1.14 乘除法器单元 MDU	111
1.14.1 乘除法单元特性	111
1.14.2 乘除法单元框图	111
1.14.3 乘除法单元功能说明	111
1.14.4 乘除法单元特殊功能寄存器	112
1.15 加密/解密加速单元	115

1.15.1	加密/解密加速器特性	115
1.15.2	加密/解密加速器框图	115
1.15.3	加密/解密加速器功能说明	116
1.16	随机数发生器	116
1.16.1	随机数发生器特性	116
1.16.2	随机数发生器框图	116
1.16.3	随机数发生器功能说明	117
1.16.4	随机数发生器特殊功能寄存器	117
1.17	通用 I/O 口以及引脚分配	118
1.17.1	通用 I/O 端口框图	118
1.17.2	通用 I/O 端口功能说明	118
1.17.3	I/O 引脚映射图	121
1.18	SPI 同步串行外设接口	132
1.18.1	SPI 接口特性	132
1.18.2	SPI 接口框图	132
1.18.3	SPI 接口功能说明	133
1.19	异步串行通信接口 UART	139
1.19.1	UART 接口特性	139
1.19.2	UART 接口框图	139
1.19.3	UART 接口功能说明	140
1.20	2 线接口	142
1.20.1	2 线接口特性	142
1.20.2	2 线接口功能说明	142
1.20.3	2 线接口特殊功能寄存器	145
1.21	ADC 转换器	148
1.21.1	ADC 转换器特性	148
1.21.2	ADC 转换器内部框图	148
1.21.3	ADC 转换器功能说明	148
1.22	模拟比较器	155
1.22.1	模拟比较器特性	155
1.22.2	模拟比较器框图	155
1.22.3	模拟比较器功能说明	156
1.23	PWM 脉宽调制	158
1.23.1	PWM 脉宽调制特性	158

1.23.2	PWM 脉宽调制框图	158
1.23.3	PWM 脉宽调制功能说明	159
1.24	nRF24LE1 绝对最大额定值	160
1.25	nRF24LE1 工作条件	161
1.26	nRF24LE1 电气特性	161
1.27	nRF24LE1 硬件调试支持	169
1.27.1	硬件调试特性	169
1.27.2	硬件调试功能说明	169
1.28	nRF24LE1 封装尺寸规格	170
1.29	nRF24LE1 应用范例	172
1.29.1	Q48 应用范例	172
1.29.2	Q32 应用范例	175
1.29.3	Q24 应用范例	177

第 2 章 带 USB2.0 接口的 2.4 GHz 无线 SOC 芯片 nRF24LU1+

2.1	nRF24LU1+介绍	179
2.1.1	nRF24LU1+基本特性	179
2.1.2	nRF24LU1+应用领域	180
2.1.3	nRF24LU1+功能	180
2.1.4	nRF24LU1+内部框图	182
2.1.5	nRF24LU1+典型系统应用	182
2.2	nRF24LU1+引脚信息	183
2.2.1	nRF24LU1+引脚分配	183
2.2.2	nRF24LU1+引脚功能	184
2.3	nRF24LU1+绝对最大额定值	185
2.4	nRF24LU1+工作条件	186
2.5	nRF24LU1+电气特性	186
2.5.1	电源消耗和时序特性	186
2.5.2	射频收/发特性	188
2.5.3	USB 接口	191
2.5.4	Flash 存储器	192
2.5.5	晶体规格	192
2.5.6	直流电气特性	192
2.6	nRF24LU1+射频收/发	193

2.6.1	射频收/发特性	193
2.6.2	射频收/发内部框图	194
2.6.3	射频收/发功能说明	194
2.6.4	增强型 ShockBurst	200
2.6.5	射频收/发数据及控制接口	218
2.6.6	寄存器图	221
2.7	USB 2.0 接口	229
2.7.1	USB 2.0 接口特性	229
2.7.2	USB 2.0 接口框图	230
2.7.3	USB 2.0 接口功能说明	230
2.7.4	USB 2.0 接口控制端点	234
2.7.5	批量/中断端点	237
2.7.6	ISO 同步端点	241
2.7.7	存储器配置	242
2.7.8	USB 控制器中断	245
2.7.9	USB 控制寄存器	247
2.8	加密/解密加速单元	258
2.8.1	加密/解密单元特性	258
2.8.2	加密/解密单元功能说明	260
2.9	SPI 主模式	262
2.9.1	SPI 主模式框图	262
2.9.2	SPI 主机功能说明	262
2.9.3	SPI 操作	263
2.10	SPI 从模式	264
2.10.1	SPI 从模式框图	264
2.10.2	SPI 从模式功能说明	264
2.10.3	SPI 时序	265
2.11	定时器/计数器	266
2.11.1	定时器/计数器特性	267
2.11.2	定时器/计数器框图	267
2.11.3	定时器/计数器功能说明	267
2.11.4	特殊功能寄存器	271
2.12	异步串行通信接口 UART	275
2.12.1	UART 特性	275

2.12.2	UART 内部框图	275
2.12.3	UART 功能说明	275
2.12.4	UART 的特殊功能寄存器	276
2.13	输入/输出端口 GPIO	278
2.13.1	标准 I/O	278
2.13.2	扩展 I/O	280
2.14	MCU	281
2.14.1	MCU 特性	282
2.14.2	MCU 内部框图	283
2.14.3	运算逻辑单元(ALU)	283
2.14.4	指令集	284
2.14.5	操作码	289
2.15	存储器和 I/O 组织	292
2.16	随机访问存储器(RAM)	298
2.17	Flash 存储器	299
2.17.1	Flash 存储器特性	299
2.17.2	Flash 存储器内部框图	300
2.17.3	Flash 存储器功能说明	300
2.17.4	掉电复位	305
2.17.5	通过 MCU 编程 Flash	305
2.17.6	通过 USB 接口的 Flash 编程	307
2.17.7	通过 SPI 编程 Flash	309
2.18	乘除法器单元 MDU	319
2.18.1	乘除法单元特性	319
2.18.2	乘除法单元框图	320
2.18.3	乘除法单元功能说明	320
2.18.4	乘除法单元特殊功能寄存器	320
2.19	看门狗和唤醒功能	323
2.19.1	看门狗特性	323
2.19.2	看门狗框图	324
2.19.3	看门狗功能说明	324
2.20	功耗管理	328
2.20.1	功耗管理特性	328
2.20.2	功耗管理框图	329

2.20.3	功耗管理工作模式	329
2.20.4	功耗管理功能说明	331
2.21	电源监控管理	333
2.21.1	电源监控管理特性	333
2.21.2	电源监控管理功能说明	333
2.22	中 断	334
2.22.1	中断特性	334
2.22.2	中断控制器框图	334
2.22.3	中断控制器功能说明	335
2.22.4	中断控制特殊功能寄存器	336
2.23	nRF24LU1+硬件调试支持	339
2.23.1	硬件调试特性	339
2.23.2	硬件调试功能说明	340
2.24	nRF24LU1+外围信息	340
2.24.1	天线输出	340
2.24.2	晶体振荡器	341
2.24.3	PCB 布局和去耦指南	341
2.25	nRF24LU1+应用范例	341
2.25.1	原理图	341
2.25.2	PCB 布局	342
2.25.3	材料清单 (BOM)	342
2.26	nRF24LU1+外形封装尺寸	344
2.27	nRF24LU1+ USB 存储器配置	345
2.27.1	USB 存储器配置 1	345
2.27.2	USB 存储器配置 2	346
2.27.3	USB 存储器配置 3	346
2.27.4	USB 存储器配置 4	347
2.28	配置与 nRF24XX 相兼容	348

第 3 章 nRFgo 嵌入式仿真开发环境

3.1	nRFgo 开发环境概述	349
3.1.1	nRFgo Starter Kit——开发母板	350
3.1.2	nRFgo Development Kits——目标板	355
3.1.3	nRFgo Studio——nRFgo 软件综合环境	357

3.1.4	nRFgo Software Development Kit——软件开发包 SDK	357
3.1.5	nRFprobe——在线仿真软件调试工具	358
3.2	如何编译并运行一个例程	358
3.2.1	Keil μ Vision 环境建立	358
3.2.2	nRFgo Studio 的安装及使用	359
3.3	如何在线调试仿真	364
3.3.1	nRFgo SDK Installation	364
3.3.2	nRFgo Start Kit 安装	364
3.3.3	nRFProbe 仿真调试工具安装	365
3.3.4	Keil μ Vision 环境设置及使用	365
第 4 章 nRF 无线 SOC 教学开发实验平台		
4.1	概 述	370
4.2	nRF24LE1 无线 SOC 开发板	370
4.3	nRF24LU+ 无线 USB 开发板	371
4.4	nRF Flash 在线下载编程器	371
4.4.1	概 述	374
4.4.2	编程器驱动程序安装	378
4.4.3	编程器使用方法及步骤	380
第 5 章 无线 SOC 实战设计之基础篇		
5.1	I/O 口的使用	382
5.2	A/D 转换	384
5.3	RTC 的使用	388
5.4	随机数发生器的使用	390
5.5	Flash 的读/写	393
5.6	看门狗的使用	398
5.7	掉电模式及唤醒	399
5.8	MDU 乘除法处理器的使用	401
5.9	无线 SOC 的收/发实验	405
第 6 章 无线 SOC 实战设计之提高篇		
6.1	2.4 GHz 有源射频 RFID 射频识别系统	413
6.1.1	2.4 GHz 有源 RFID 卡的实现	414

6.1.2	2.4 GHz 有源 RFID 阅读器(Reader)的实现	422
6.2	2.4 GHz 无线 USB 的应用	429
6.2.1	USB 描述符	430
6.2.2	nRF24LU1+关于 USB 应用的程序范例	434
6.3	2.4 GHz 无线数字语音双向传输	436
6.3.1	工作原理	437
6.3.2	nRF24LE1 核心电路原理图	438
6.3.3	MIC 放大器原理图	440
6.3.4	PWM 滤波及驱动原理图	441
6.3.5	软件实现方法	441
第 7 章 无线通信协议及 Gazell 介绍		
7.1	为什么需要无线通信协议	443
7.2	无线通信协议基本原理及设计	443
7.2.1	编码方式	444
7.2.2	差错控制	446
7.3	Gazell 协议	447
7.3.1	Gazell 星形网络任务	448
7.3.2	Gazell 协议的特点	448
7.3.3	协议状态	450
7.3.4	Gazell 中协议的时序	454
7.3.5	Gazell 中的数据通道和地址	454
7.3.6	配 置	457
7.3.7	Gazell 典型应用——在 Keil C 中用 Gazell 协议实现按键的无线传输	461
第 8 章 2.4 GHz 无线桌面套装参考设计		
8.1	2.4 GHz 无线桌面套装介绍	464
8.2	nRF6901——桌面套装之无线 USB 适配器	465
8.2.1	无线 USB 适配器介绍	465
8.2.2	无线 USB 适配器主要硬件功能	465
8.2.3	无线 USB 适配器硬件照片	466
8.2.4	无线 USB 适配器框图	467
8.2.5	无线 USB 适配器原理图	467

8.2.6	材料清单	469
8.2.7	PCB 规格	470
8.2.8	PCB 布局图	470
8.2.9	无线 USB 适配器软件流程图	471
8.3	nRF6902——桌面套装之 2.4 GHz 无线键盘	472
8.3.1	无线键盘介绍	472
8.3.2	无线键盘主要硬件功能	473
8.3.3	无线键盘硬件照片	473
8.3.4	无线键盘功能框图	474
8.3.5	无线键盘原理图	474
8.3.6	PCB 规格	478
8.3.7	无线键盘软件流程图	478
8.4	nRF6903——桌面套装之 2.4 GHz 无线鼠标	478
8.4.1	无线鼠标介绍	478
8.4.2	无线鼠标主要硬件功能	478
8.4.3	无线鼠标硬件照片	480
8.4.4	无线鼠标框图	481
8.4.5	无线鼠标原理图	482
8.4.6	材料清单	485
8.4.7	PCB 规格	487
8.4.8	PCB 布局图	487
8.4.9	无线鼠标软件流程图	487
8.5	nRF6904——桌面套装之 2.4 GHz 无线遥控器	490
8.5.1	无线遥控器介绍	490
8.5.2	无线遥控器主要硬件特性	490
8.5.3	无线遥控器硬件照片	490
8.5.4	无线遥控器框图	491
8.5.5	无线遥控器原理图	491
8.5.6	材料清单	494
8.5.7	PCB 规格	495
8.5.8	PCB 布局图	495
8.5.9	无线遥控器软件流程图	495
	参考文献	497

第 1 章

2.4 GHz 无线 SOC 芯片 nRF24LE1

1.1 nRF24LE1 介绍

nRF24LE1 是低成本、高性能的嵌入式微处理器智能射频收发器家族成员。nRF24LE1 是为单片超低功耗无线应用而优化设计的,集成了高性能微处理器、Flash 存储器、低功耗振荡器、实时计数器、AES 硬件加密器、随机数发生器、节能控制部件等并提供了一个理想的无线协议平台。使用 nRF24LE1 带来的好处包括与协议的无缝连接、安全性、低功耗以及改进的抗干扰性能。对于应用层,nRF24LE1 提供了丰富的外设,如 SPI、2 线、UART、6~12 位 ADC、PWM 及一个低功耗的可作为系统电平唤醒的模拟比较器。

nRF24LE1 提供三种不同封装:

- 超小型 4 mm×4 mm 24 引脚 QFN 封装(7 个通用 I/O);
- 紧凑型 5 mm×5 mm 32 引脚 QFN 封装(15 个通用 I/O);
- 7×7mm 48 引脚 QFN 封装(31 个通用 I/O)。

4 mm×4 mm 24 引脚 QFN 封装是小尺寸、低 I/O 应用的理想选择,例如,可穿戴的运动传感器及手表。5 mm×5 mm 32 引脚 QFN 封装是中度 I/O 应用,如无线鼠标、遥控装置以及智能玩具的理想选择。7 mm×7 mm 48 引脚 QFN 封装是多 I/O 应用,如无线键盘应用的理想选择。

1.1.1 nRF24LE1 特性

nRF24LE1 具有如下特性:

- nRF24L01 + 2.4 GHz 射频收发 (250 kbps, 1 Mbps, 2 Mbps 空中速率);
- 高速处理器 (8051 指令兼容);