

无线单片机技术丛书



Nordic 中短距离无线应用 入门与实践

谭晖 编著



北京航空航天大学出版社

无线单片机技术丛书

内容简介

Nordic 中短距离无线应用 入门与实践

谭 晖 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

中短距离无线技术的应用越来越广泛,本书作为中短距离无线技术应用的入门及提高的书籍,着重介绍Nordic系列中短距离无线芯片的原理和应用,并提供了应用演示源程序,便于快速实验及测试;此外,还介绍了nRF无线教学开发实验平台;最后,以应用为背景介绍了实际的无线设计。

目前广大技术人员对中短距离无线技术非常感兴趣,本书以应用为背景,以实战为基础,从基本理论到实践应用环环相扣,可以迅速了解和掌握Nordic系列中短距离无线技术的设计和应用,可作为个人、学生、无线爱好者和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、自动化和无线通信等专业相关课程的教材,适用面广,实用性强。

图书在版编目(CIP)数据

Nordic 中短距离无线应用入门与实践/谭晖编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2009.12
ISBN 978-7-81124-957-6

I. N… II. 谭… III. 无线电技术 IV. TN014

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 206220 号

Nordic 中短距离无线应用入门与实践

谭 晖 编 著

责任编辑 李 青 李冠咏 李 玉

*

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: bhp@buaapress.com.cn

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:19.25 字数:431千字

2009年12月第1版 2009年12月第1次印刷 印数:3000册

ISBN 978-7-81124-957-6 定价:35.00元

前言

无线中短距离通信是当前的一个“热点”，越来越多的人开始关注这一领域，并希望将其纳入自己的行业或领域中，但在初次接触和使用时会往往会遇到一些困难，而无从下手。

本书是介绍 nRF 系列中短距离无线收发芯片及应用的书籍。作为较早进入国内市场的中短距离无线收发芯片之一，来自北欧挪威的 nRF 无线芯片已经得到市场的认可及广泛的应用，如已被大家所熟悉的低频段的 nRF9xx 系列，以及 2.4 GHz 频段的 nRF24xx 系列。从无线抄表、汽车防盗、计算机外设、射频识别卡乃至医学诊断无线胶囊等，涵盖了多行业的应用。作为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，从使用者的便利角度出发，不需要做复杂的配置和操作，初次使用时很容易理解及操作；Nordic 产品的超低功耗性能奠定了业界的标杆，这也是 Nordic 产品非常重要的特点，这意味着便携产品的电池使用寿命可以更长，更环保节能；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谐波等 RF 指标的要求。

各国对射频产品有严格的安规要求，如美国 FCC、欧盟 CE 等，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。另外，除了 RF 器件本身的性能外，良好的通信协议设计对于实现好的通信效果也是不可缺少的。Nordic 最新推出的无线 SOC 系列，以及专门为其所开发的 Gazell 协议及源码有更好的复杂环境下的抗干扰性能，用户只须关注应用的实现，而抗干扰等相关处理可交由 Gazell 协议来实现，是新一代的射频应用平台，可以在新的设计中考考虑选用。

无线射频应用是一门实践性很强的技术，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。本书对常用的 nRF 无线芯片进行了详细的介绍，从基本原理着手，提供应用设计指导，并为不同的应用编写了可测试及演示的源代码。

第 1 章介绍射频设计中的基本概念、电波传播基本理论以及射频设计中常用的一些基本概念；第 2 章介绍天线基本原理、天线基本概念以及中短距离无线应用中常用的天线类型及特性；第 3 章介绍 433/868/915 MHz 单片无线收发芯片 nRF905 的原理及应用；第 4 章介绍内置 51 微处理器 430/868/915 MHz 系统级无线 SOC 芯片 nRF9E5 的原理及应用；第 5 章介绍 2.4 GHz 单片无线收发芯片 nRF24L01 的原理及应用；第 6 章介绍 nRF 无线教学开发实验平台；第 7 章介绍 2.4 GHz 单片 CD 音质无线 SOC 数字音频芯片 nRF24Z1 的原理及应用。

希望通过本书的相关内容，能够为中短距离无线应用的入门及实践开启一扇窗户，通过这

扇窗户,无线应用不再神秘与遥远。只要有一定的理论基础,并加以充分的实践,掌握无线并不是一件难事。有一句话“无线的应用是无限的”,这在一定程度上说明了无线应用的前景。在设计及应用中,只要充分发挥想象,有许多部分可以应用到无线的领域,为产品开发增加创新并提升产品的附加值。

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、开发工具等设备有兴趣,也可以访问此网站查看购买方式。

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;同时感谢 Nordic 公司亚太区技术团队 Kjartan、John 和 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请读者及专家指正。

谭 晖

2009 年 7 月

目 录

第 1 章 射频设计中的基本概念	1
1.1 电磁波传播	1
1.1.1 自由空间无线传播	1
1.1.2 工作频率与通信距离的关系	3
1.2 关于阻抗及阻抗匹配	3
1.3 调制方式 ASK,FSK,GFSK	4
1.4 关于 dB 和 dBm	5
第 2 章 天线基本原理	6
2.1 概 述	6
2.2 天线类型	7
2.3 外界因素对天线的影响	9
2.4 天线的调谐	10
2.5 天线与频率、增益及效率的关系	10
2.6 天线在无线通信系统中的作用	11
第 3 章 433/868/915 MHz 单片无线收发芯片 nRF905	13
3.1 nRF905 功能概述	13
3.2 nRF905 内部框图	13
3.3 引脚功能	14
3.4 工作模式	16
3.5 配置及时序	18
3.6 外设及 RF 设置	26
3.6.1 晶体规格	26
3.6.2 外部时钟基准	27
3.6.3 微处理器输出时钟	27
3.6.4 天线输出	27
3.6.5 RF 输出功率调节	27



3.6.6	调 制	28
3.6.7	RF 输出频率	28
3.6.8	PCB 布局设计及退耦指南	29
3.7	nRF905 的功能	29
3.7.1	载波检测	29
3.7.2	地址匹配	29
3.7.3	数据准备就绪	30
3.7.4	自动重发	30
3.7.5	低功耗接收模式	30
3.8	nRF905 环形天线差分连接的应用实例	31
3.9	nRF905 单端 50 Ω 阻抗天线连接的应用实例	33
3.10	nRF905 无线收发模块	35
第 4 章 内置 51 微处理器 433/868/915 MHz 系统级		
	无线 SOC 芯片 nRF9E5	39
4.1	概 述	39
4.1.1	微处理器	39
4.1.2	存储器结构	40
4.1.3	导入 EEPROM/Flash	40
4.1.4	存储器映射	41
4.1.5	PWM	41
4.1.6	SPI	42
4.1.7	端口逻辑	42
4.1.8	电源管理	42
4.1.9	低频时钟、RTC 唤醒定时器、GPIO 唤醒功能和看门狗	42
4.1.10	XTAL 振荡器	43
4.1.11	A/D 转换器	43
4.1.12	无线电收发器	43
4.2	主要电气特性	43
4.3	引脚分配	46
4.4	引脚功能	47
4.5	系统时钟	48
4.6	数字输入/输出	48
4.6.1	复位期间 I/O 口状态	49

4.6.2	P0 口	49
4.6.3	P1 口(P1 或者 SPI 口)	50
4.7	模拟部分	51
4.7.1	晶体规格	51
4.7.2	天线输出	52
4.7.3	ADC 输入	52
4.7.4	参考电流	52
4.7.5	数字电源去耦	52
4.8	A/D 转换器和收发器的内部接口	52
4.8.1	P2 口——无线发射通用 I/O 口	52
4.8.2	通过 SPI 接口来控制收发器	54
4.8.3	复位过程中 P2 口状态	54
4.9	无线收发器子系统(nRF905)	54
4.9.1	RF 工作模式	54
4.9.2	nRF ShockBurst 模式	55
4.9.3	待机模式	57
4.9.4	RF 输出功率调节	57
4.9.5	调 制	59
4.9.6	输出频率	59
4.9.7	载波检测	59
4.9.8	地址匹配	60
4.9.9	数据准备就绪	60
4.9.10	自动重发	60
4.9.11	低功耗接收模式	60
4.10	A/D 转换器子系统	61
4.10.1	A/D 转换器	61
4.10.2	A/D 转换器的使用	62
4.10.2.1	使用外部参考电压时的测量值	62
4.10.2.2	使用内部参考电压时的测量值	62
4.10.2.3	供电电压的计算	63
4.10.3	A/D 转换器采样和时序	63
4.11	收发器和 A/D 转换器配置	64
4.11.1	片内 SPI 寄存器配置	64
4.11.2	SPI 指令设置	66

4.11.3	SPI 时序	66
4.11.4	RF 配置寄存器说明	67
4.11.5	ADC 配置寄存器说明	68
4.11.6	状态寄存器说明	69
4.11.7	RF 寄存器控制字	70
4.11.8	ADC 配置寄存器	71
4.11.9	ADC 数据寄存器	71
4.11.10	状态寄存器	71
4.12	接收器子系统时序	72
4.12.1	装置转换时间	72
4.12.2	ShockBurst™ TX 时序	72
4.12.3	ShockBurst™ RX 时序	72
4.12.4	前导码	74
4.12.5	空中传输时间	74
4.13	SPI	74
4.14	PWM	75
4.15	中 断	76
4.15.1	中断 SFRs	77
4.15.2	中断处理	80
4.15.3	中断屏蔽	80
4.15.4	中断优先级	80
4.15.5	中断采样	80
4.15.6	中断响应	81
4.15.7	掉电模式下的中断响应	81
4.15.8	单步操作	81
4.16	低频时钟唤醒功能和看门狗	81
4.16.1	低频时钟	81
4.16.2	嘀哒校准	82
4.16.3	RTC 唤醒定时器	82
4.16.4	可编程 GPIO 唤醒功能	83
4.16.5	看门狗	84
4.16.6	看门狗及各唤醒功能接口程序设计	84
4.16.7	复 位	86
4.16.7.1	上电复位	86

4.16.7.2	看门狗复位	86
4.16.7.3	复位后程序地址	86
4.17	节能模式	87
4.17.1	标准 8051 节能模式	87
4.17.1.1	待机模式	87
4.17.1.2	掉电保护模式	88
4.17.2	附加掉电模式	88
4.18	微控制器	89
4.18.1	存储器结构	89
4.18.1.1	程序/数据存储器	89
4.18.1.2	内部数据存储器	89
4.18.2	外部 EEPROM 的程序格式	90
4.18.3	指令设置	91
4.18.4	指令时序	96
4.18.5	双数据指针	97
4.18.6	特殊功能寄存器	97
4.18.7	nRF9E5 特有的 SFR 寄存器	101
4.18.8	定时/计数器	102
4.18.8.1	定时器 0 和 1	102
4.18.8.2	定时器速率控制	106
4.18.8.3	定时器 2	107
4.18.9	串 口	110
4.18.9.1	工作方式 0	112
4.18.9.2	工作方式 1	112
4.18.9.3	工作方式 2	116
4.18.9.4	工作方式 3	117
4.18.9.5	多处理机通信	117
4.19	封装外形尺寸	118
4.20	PCB 布局设计及去耦指南	119
4.21	应用实例	119
4.21.1	环形天线的差分连接原理图	119
4.21.2	PCB 布局设计实例——环形天线的差分连接	122
4.21.3	单端连接的 50 Ω 阻抗天线	122
4.21.4	PCB 布局设计实例——单端连接的 50 Ω 阻抗天线	125

4.21.5	配置成 nRF905 芯片	126
4.22	nRF9E5 无线收发模块	126
4.23	nRF9E5 快速开发系统	127
4.23.1	nRF9E5 快速开发系统的安装	128
4.23.2	nRF9E5 开发板的使用	128
4.23.3	EEPROM 转换工具的使用	129
4.23.4	Keil C 下的 ISD 在线调试	129
4.23.5	nRF9E5 快速开发系统原理图	132
4.24	nRF9E5 之程序实战设计	133
4.24.1	I/O 口的使用	133
4.24.2	A/D 转换	135
4.24.3	RTC 的使用	138
4.24.4	看门狗的使用	139
4.24.5	掉电模式及唤醒	140
4.24.6	外部 EEPROM 的读/写	141
4.24.7	nRF9E5 无线收发实验	148
第 5 章	2.4 GHz 单片无线收发芯片 nRF24L01	156
5.1	nRF24L01 概述	156
5.1.1	内部结构框图	156
5.1.2	引脚及其功能	157
5.2	主要电气特性	158
5.3	基本功能介绍	160
5.3.1	工作模式	160
5.3.2	数据包处理方式	161
5.3.2.1	ShockBurst™ 模式	161
5.3.2.2	增强型的 ShockBurst™ 模式	161
5.3.3	自动应答	165
5.3.4	自动重发功能	165
5.3.5	用于增强型 ShockBurst™ 模式下的数据包识别(PID)和 CRC 校验	165
5.3.6	载波检测 CD	166
5.3.7	数据通道	166
5.4	器件配置	168
5.4.1	SPI 命令	168

5.4.2	中 断	169
5.4.3	SPI 时序	169
5.4.4	寄存器映像地址	171
5.4.5	与 nRF24xx 兼容通信时 nRF24L01 的寄存器配置	177
5.4.5.1	如何配置 nRF24L01 从 nRF2401/nRF2402/nRF24E1/nRF24E2 接收数据	177
5.4.5.2	如何配置 nRF24L01 发射, nRF2401/nRF2402/nRF24E1/nRF24E2 接收数据	177
5.5	包格式说明	178
5.6	重要的时序数据	178
5.7	RF 信息	180
5.7.1	天线输出	180
5.7.2	RF 输出功率调节	180
5.8	晶体规格	180
5.9	PCB 布局设计及去耦指南	182
5.10	典型应用原理图	182
5.11	PCB 天线输出的 nRF24L01 射频板布局	184
5.12	50 Ω SMA 单端天线输出的 nRF24L01 射频板布局	184
5.13	nRF24L01 无线收发模块	184
5.14	超小型 nRF24L01 无线收发模块	187
5.15	nRF24L01 加大功率型 2.4 GHz 无线 PA 模块	188

第 6 章 nRF 无线教学开发实验平台

6.1	概 述	189
6.2	nRF905&L01-Quick-Dev 教学开发实验平台	189
6.2.1	nRF905&L01-Quick-Dev 教学开发平台母板原理图	190
6.2.2	nRF905 无线模块原理图	190
6.2.3	nRF24L01 无线收发模块原理图	193
6.3	51 单片机在线编程软件安装及使用	194
6.3.1	解压缩在线编程软件	194
6.3.2	在线下载程序的使用方法及步骤	195
6.4	无线收发实验	196
6.4.1	2.4 GHz 无线收发实验	197
6.4.2	433 MHz 无线收发实验	205

第 7 章 2.4 GHz 单片 CD 音质无线 SOC 数字音频芯片 nRF24Z1	213
7.1 概 述	213
7.1.1 引脚定义	214
7.1.2 引脚功能	214
7.2 术语表	216
7.3 结构概述	217
7.3.1 基本工作模式	218
7.3.2 通信和数据传输原理	218
7.3.2.1 数据通道定义	218
7.3.2.2 数据流和结构	219
7.3.3 模式和接口选择	220
7.3.4 音频发射器 (ATX)	221
7.3.4.1 I ² S 音频输入	222
7.3.4.2 S/PDIF 音频输入	223
7.3.4.3 串行控制(从)接口	223
7.3.4.4 主接口	223
7.3.4.5 直接数据输入脚	223
7.3.4.6 中断输出	223
7.3.5 音频接收器 (ARX)	223
7.3.5.1 I ² S 音频输出	224
7.3.5.2 S/PDIF 音频输出	225
7.3.5.3 主接口	225
7.3.5.4 串行从接口	226
7.3.5.5 并行口和 PWM	226
7.3.6 ATX 和 ARX 相同部分的框图和功能	226
7.3.6.1 晶体振荡器	226
7.3.6.2 射频收发器	226
7.3.6.3 QoS 服务质量引擎	227
7.3.6.4 音频压缩/解压缩	227
7.3.6.5 电源稳压器	227
7.3.6.6 偏压参考/复位	227
7.4 工作概述	228
7.4.1 上电/复位顺序	228

7.4.2	射频链接初始化	228
7.4.2.1	空闲状态	228
7.4.2.2	链路查找状态	229
7.4.2.3	同步状态	229
7.4.3	音频通道	229
7.4.4	控制通道	230
7.4.5	掉电模式	230
7.5	nRF24Z1 寄存器映射	231
7.5.1	从 ATX 端的寄存器访问	231
7.5.2	从 ARX 端的寄存器访问	234
7.5.3	外部 EEPROM 的寄存器映射	234
7.6	数字 I/O	234
7.6.1	复位期间的数字 I/O 特性	235
7.6.2	音频接口	235
7.6.2.1	I ² S 音频接口	235
7.6.2.2	S/PDIF 音频接口	235
7.6.2.3	音频接口功能	236
7.6.2.4	ATX 音频接口控制	237
7.6.2.5	ARX 音频接口控制	239
7.6.2.6	I ² S 音频接口时序	240
7.6.3	串行主接口	242
7.6.4	控制和 GPIO 接口	246
7.6.4.1	ATX 接口和引脚配置	246
7.6.4.2	SPI 从接口	247
7.6.4.3	2 线从接口	247
7.6.4.4	通用输入引脚 D[2:0]	248
7.6.4.5	ATX 控制接口时序	249
7.6.4.6	ARX 控制接口选择	250
7.6.4.7	ARX GPIO 引脚	251
7.6.5	数据通道时序	253
7.6.5.1	前向数据通道:数据从 ATX 到 ARX	253
7.6.5.2	反向数据通道:数据从 ARX 到 ATX	254
7.7	服务质量引擎(QoS)和射频协议	256
7.7.1	链路建立	256

7.7.2	射频协议	256
7.7.3	自适应跳频(AFH)	257
7.7.4	链接寄存器	258
7.7.5	射频输出功率	260
7.8	中 断	261
7.9	复位输出	262
7.10	掉电控制	263
7.10.1	激活掉电模式	263
7.10.2	从掉电模式唤醒	264
7.10.2.1	中断唤醒	264
7.10.2.2	定时器唤醒	265
7.10.2.3	由自动掉电模式唤醒	266
7.10.2.4	当唤醒时中断一个外部 MCU	266
7.10.3	nRF24Z1 节电方式举例	266
7.11	通过控制通道更新寄存器	267
7.12	测试模式	269
7.13	电气特性	270
7.14	绝对最大额定值	273
7.15	封装信息	273
7.16	应用信息	275
7.16.1	天线 I/O	275
7.16.2	晶体规格	275
7.16.3	偏压参考电阻	275
7.16.4	内部数字供电去耦	275
7.16.5	PCB 布局和去耦指南	276
7.17	nRF24Z1 基本应用设计	276
7.17.1	nRF24Z1 原理图	276
7.17.2	nRF24Z1 射频板 PCB 布局	278
7.17.3	nRF24Z1 材料清单	280
7.17.3.1	ATX 材料清单	280
7.17.3.2	ARX 材料清单	280
7.18	nRF24Z1 典型应用——2.4 GHz 数字无线立体声音箱	281
7.18.1	ATX 音频发射器	281
7.18.2	ARX 音频接收器	283

7.18.3 nRF24Z1 的寄存器配置	283
7.18.4 2.4 GHz 数字无线音箱模块及电气特性参数	286
7.18.5 2.4 GHz 数字无线音箱的频响特性实测	287
7.19 nRF24Z1 典型应用设计——2.4 GHz 数字无线立体声耳机	288
参考文献	290

第 1 章

射频设计中的基本概念

1.1 电磁波传播

电磁波是人类用于远距离实时接收和发送信息的主要载体之一,也是射频通信的基础,因此有必要简单回顾一下电磁波的历史。

电磁学的重要奠基人法拉第一生从事电磁现象的实验研究,他最主要的贡献除了发现作为电磁学基础的电磁感应定律之外,还提出了“电磁场”的新概念,并且用电力线和磁力线来描述电磁场。另一位伟大的理论物理学家麦克斯韦总结了法拉第等人广泛的实验研究成果,在1873年发表的著名论文中,提出了著名的麦克斯韦方程组,从而奠定了光学、电磁学和电磁波传播的理论基础。重要的是,麦克斯韦方程组预示了电磁波的存在,且其传播速度应等于光速。1888年,德国物理学家赫兹,用实验测量证明了电磁波的存在以及电磁波的传播速度等于光速。

研究任何无线电通信系统,必须首先对电波传播做研究,因为它直接关系到无线通信性能和指标的确定,关系到频率的选择和通信距离的计算,关系到如何实现可靠的无线通信。

1.1.1 自由空间无线传播

所谓自由空间,严格来说应指真空。通常把均匀无损耗的无限大空间视为自由空间,而自由空间具有各向同性,电导率为零,相对介电系数和相对导磁率均恒为一的特点。电波在自由空间传播时,其能量既不会被障碍物所吸收,也不会产生反射或散射。自由空间是一种理想的情况。但是实际上无限大空间电磁波传播路径是不可能获得这种理想条件的,现实的电波传播媒质是有损耗且不均匀的,而电波传播的过程除了有衰减外,还会出现折射、反射、散射和绕射等现象。即便如此,在研究无线电波传播时,为了提供一个可以比较各种传播情况的标准并简化