

性能特点

- 全集成 700/800/900MHz 频段收发器
 - 中国 WPAN 频段 779 至 787MHz
 - 欧洲 SRD 频段 863 至 870MHz
 - 北美 ISM 频段 902 至 928MHz
- 配有多个不同调制制式与数据传输速率的直接时序扩展频谱
 - 数据传输速率为 20kbit/s 与 40kbit/s 的 BPSK 调制制式(符合 IEEE802.15.4-2006 标准)
 - 数据传输速率为 100kbit/s 与 250kbit/s 的 O-QPSK 调制制式(符合 IEEE802.15.4-2006 标准)
 - 数据传输速率为 250kbit/s 的 O-QPSK 调制制式(符合 IEEE P802.15.4c 标准)
 - PSDU 数据传输速率为 200kbit/s、400kbit/s、500kbit/s 及 1000kbit/s 的 O-QPSK 调制制式
- 多频谱与数据传输速率的灵活组合
- 业界领先的链路预算
 - 接受灵敏度可达-110dBm
 - 可编程发送输出功率可达+10dBm
- 低电源电压: 1.8V 至 3.6V
 - 内置电压调节器及电池监视器
- 低电流消耗
 - 睡眠(SLEEP)=0.2 μ A
 - 收发器关闭(TRX_OFF)=0.4mA
 - 接收状态(RX_ON)=9.0mA
 - 占用状态(BUSY_TX)=18mA(于发送功率=5dBm 时)
- 数字接口
 - 寄存器、帧缓冲及通过 SPI(状态包检测)实现 AES(高级加密标准)
 - 可设置速率的时钟输出
- 无线电收发器性能特点
 - 可调节接受灵敏度
 - 内置发送/接收开关, LNA 及 PLL 环路滤波器
 - 快速建立 PLL 支持频率
 - 自动压控振荡器(VCO)及滤波器校准
 - 内置 16MHz 晶体振荡器
 - 128 字节发送/接收“先入先出”(FIFO)功能
- IEEE802.15.4-2006 标准硬件支持
 - 帧校验时序(FCS)的计算与检查
 - 空信道检测
 - 接收信号强度指示器, 能量检测及链路质量指示
- MAC 协议硬件加速器
 - 自动确认及重传
 - CSMA-CA 及 LBT 协议
 - 自动帧滤波
- AES(高级加密标准) 128 位硬件加速器(ECB 与 CBC 模式)
- 扩展功能包硬件支持功能
 - 安全应用的真随机数生成
 - 发送/接收指示(外置 RF 前端控制)
 - 基于 MAC 协议的天线分集
- 优化设计旨在降低材料成本并简化生产过程
 - 低外置部件成本: 天线, 参照晶体及旁路电容
 - 卓越的抗静电放电(ESD)保护性能
- 作业温度范围为-40°C 至+85°C
- 32 针塑料方形扁平无引线(QFN)封装, 尺寸为 5.0x5.0x0.9mm³
- 符合 IEEE802.15.4-2003、IEEE802.15.4-2006 及 IEEE P802.15.4c/D6, ETSI EN 300 220-1 及



AVR[®]

AT86RF212

适用于 IEEE802.15.4 与 P802.15.4c 标准草拟修订本标准, 采用 Zigbee, 6LoWPAN 及 ISM 技术频段应用的 700/800/900MHz 频段低功耗收发器

初级

8168B-MCU Wireless-03/09





FCC 47 CFR 第 15.247 节的标准要求

免责声明

本数据手册中所含值乃基于以类似处理技术制造的其他收发器的模拟与特性表征。待设备特性设置确定之后将提供最终值。

1. 概览

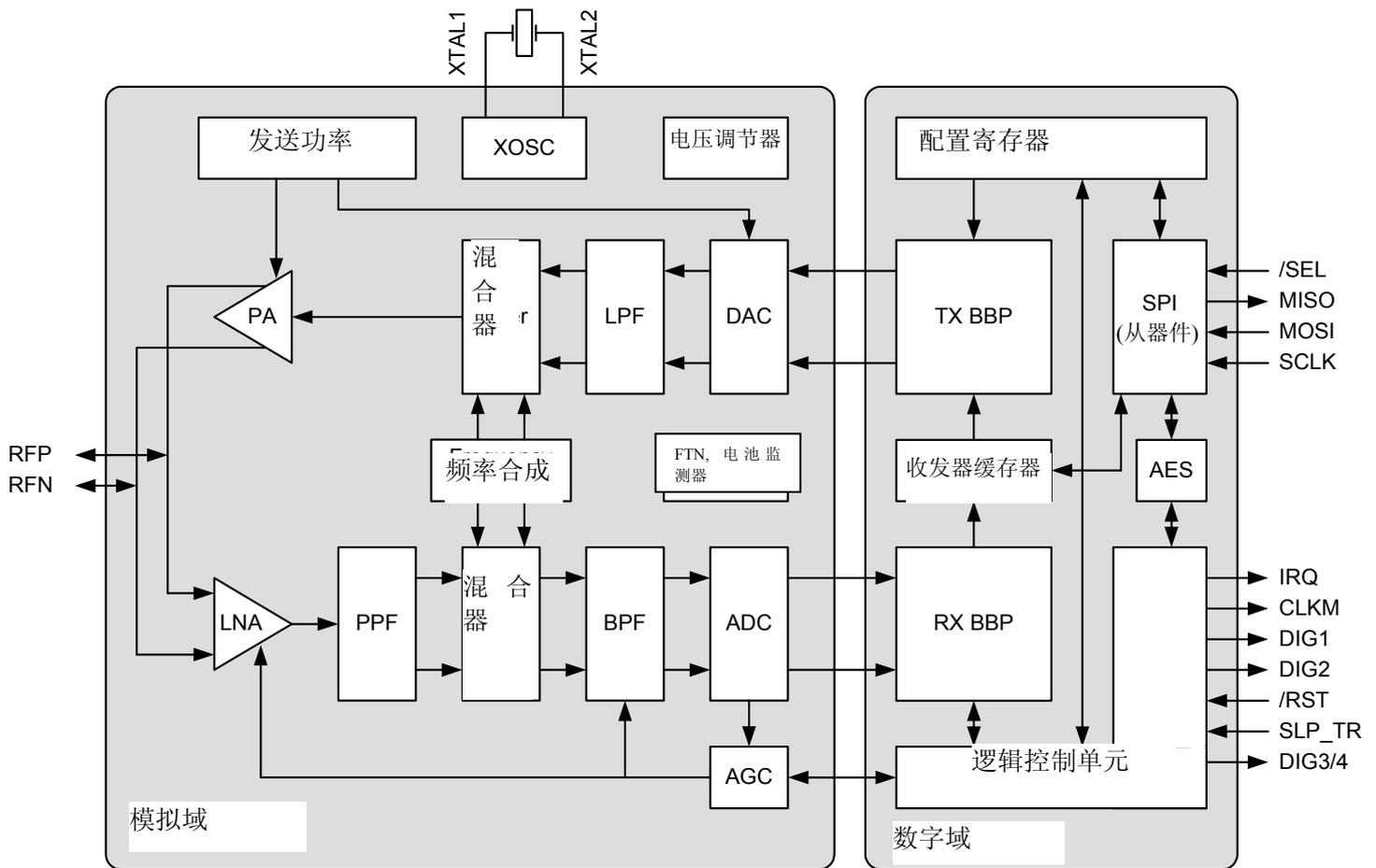
AT86RF212 是一款专为低成本的 IEEE802.15.4 标准 ZigBee™ 技术、6LoWPAN 技术与高数据传输速率的 ISM 应用而设计的低功耗、低电压 700/800/900MHz 频段收发器。为了支持 sub-1 GHz 频段，设备可支持 IEEE 802.15.4-2003 标准[2]低数据传输速率（20 和 40kbit/s）并通过 O-QPSK 调制制式分别支持符合 IEEE 802.15.4-2006[1]和 IEEE P802.15.4c 草拟修订本[3]标准的选用数据传输速率（100 和 250kbit/s）。此外，还可实现特有的高达 1000 kbit/s 的高数据传输速率模式。

AT86RF212 是真正的 SPI 到天线的解决方案。除了天线、晶体振荡器和去耦电容外，所有的 RF 主要元件都集成在单一芯片内。MAC 及 AES 硬件加速改善整个系统的功耗利用率和时效性。

1.1 基本电路说明

单片无线电收发器 AT86RF212 提供了在天线和微控制器接口之间的完整无线电接口。它包括了模拟无线电器件和数字调制器与解调器，包括时间和频率同步以及数据缓冲器。将外置器件的数量尽可能地减少，只须将天线、一个滤波器（用于高输出功率电平）、晶体和四个旁路电容外置。而双向差分天线引脚通常用于发送和接收，因此无需外部天线开关。通过两个数字控制信号（差分操作）实现对外置功率放大器的控制。收发器结构图如图 1-1 所示。

图 1-1 AT86RF212 结构图



接收器通路以低中频结构为基础。在经过信道化滤波与下变频处理之后，对低中频信号取样并经数字信号处理器件处理。发送器与接收器之间的通信基于配有多多个不同调制制式及扩展编码的直接时序扩展频谱。AT86RF212 支持 IEEE802.15.4-2006 标准的强制性 BPSK 调制制式及可选用的 868.3MHz 及 915MHz 频段 O-QPSK 调制制式。此外，它还支持在 IEEE P802.15.4c 标准下对 780MHz 中国频段规定的 O-QPSK 调制制式。

一个 128 字节收发器缓存器负责存储接收或发射的数据。

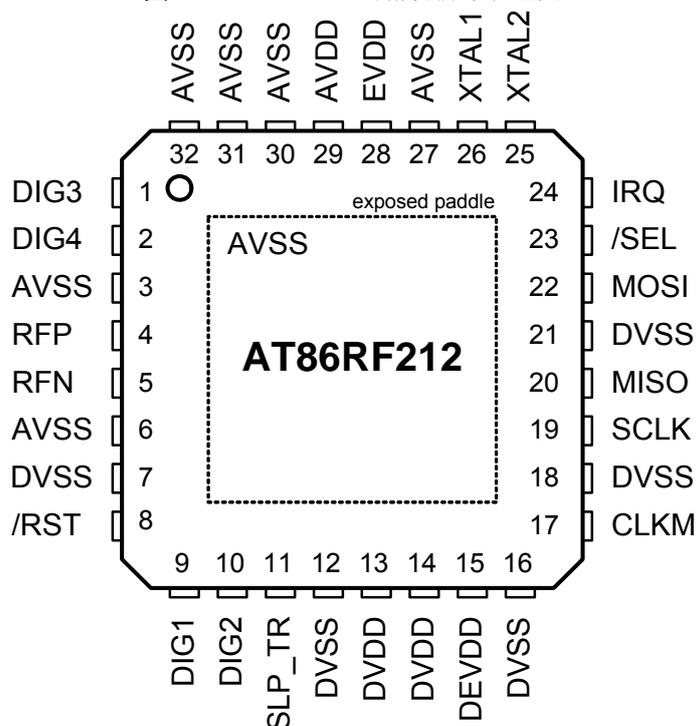
AT86RF212 无线电收发器具有硬件支持的 128 位安全操作特色功能。可在平行于所有 PHY 操作模式的情况下，访问完全独立的 AES 加解密引擎。AT86RF212 的配置，数据存储器读取与写入及 AES 硬件引擎均由 SPI 接口及附加控制信号控制。

单芯片低压差电压调节器可为模拟域与数字域提供 1.8V 电源。当调节器关闭时，控制寄存器将保持其在睡眠模式下的设置。发送与接收信号处理通路均经过高度集成与优化，以实现低功耗的目的。

2. 引脚配置

2.1 引脚排列原理图

图 2-1 AT86RF212 引脚排列原理图



附注：裸露焊盘电路与封装内垫板连接。应将其焊接至电路板上以保证电接触与热接触正常和良好的机械稳定性。

2.2 引脚说明

表 2-1 引脚说明

引脚	名称	类型	说明
1	DIG3	数字输出	接收/发送指示，参见 9.4 小节； 如不可用，则内拉至 AVSS
2	DIG4	数字输出	接收/发送（DIG3 转换）指示，参见 9.4 小节； 如不可用，内拉至 AVSS
3	AVSS	接地端	RF 信号接地端
4	RFP	RF I/O	差分 RF 信号
5	RFN	RF I/O	差分 RF 信号
6	AVSS	接地端	RF 信号接地端
7	DVSS	接地端	数字接地端
8	/RST	数字输入	芯片低可用复位
9	DIG1	数字输出	天线分集 RF 开关控制，参看 9.3 小节； 如不可用，则内拉至 DVSS

引脚	名称	类型	说明
10	DIG2	数字输出	1.天线分集 RF 开关控制 (DIG1 转换), 参看 9.3 小节 2.发送器帧时间戳信号 IRQ_2(发送器_启动), 参看 9.5 小节。 如不可用, 则内拉至 DVSS
11	SLP_TR	数字输入	控制睡眠, 发送启动, 接收状态; 高有效, 参看 4.6 小节
12	DVSS	接地端	数字接地端
13	DVDD	模拟	1.8V 内置稳压电源; 数字域, 参看 7.5 小节
14	DVDD	模拟	1.8V 内置稳压电源; 数字域, 参看 7.5 小节
15	DEVDD	电源	外置电源电压; 数字域
16	DVSS	接地端	数字接地端
17	CLKM	数字输出	主时钟信号输出; 如不可用则下拉, 参看 7.7 小节
18	DVSS	接地端	数字接地端
19	SCLK	数字输入	SPI 时钟
20	MISO	数字输出	SPI 数据输出 (主输入从输出)
21	DVSS	接地端	数字接地端
22	MOSI	数字输入	SPI 数据输出 (主输出从输入)
23	/SEL	数字输入	SPI 选择, 低可用
24	IRQ	数字输出	1. 中断请求信号; 高可用或低可用, 参看 4.7 小节 2. 缓存电平模式指示器; 高可用
25	XTAL2	模拟	晶体引脚, 参看 2.2.1.3 和 7.7 小节
26	XTAL1	模拟	晶体引脚或外置时钟电源, 参看 2.2.1.3 和 7.7 小节
27	AVSS	接地端	模拟接地端
28	EVDD	电源	外置电源, 模拟域
29	AVDD	模拟	1.8V 内置稳压电源; 模拟域, 参看 7.5 小节
30	AVSS	接地端	模拟接地端
31	AVSS	接地端	模拟接地端
32	AVSS	接地端	模拟接地端
焊盘	AVSS	接地端	模拟接地端; QFN 封装裸露焊盘

2.2.1 模拟引脚与 RF 引脚

2.2.1.1 电源引脚与接地引脚

EVDD,DEVDD

EVDD 与 DEVDD 为 AT86RF212 无线电收发器的模拟与数字电源电压引脚。

AVDD, DVDD

AVDD 与 DVDD 为内置电压调节器, 为保证稳定操作须使用旁路电容。电压调节器由无线电收发器状态机独立控制, 其可用性取决于当前的无线电收发器状态。可为外部电源配置电压调节器。详情参看 7.5 小节。

AVSS,DVSS

AVSS 和 DVSS 分别为模拟与数字接地引脚。

2.2.1.2 RF 引脚

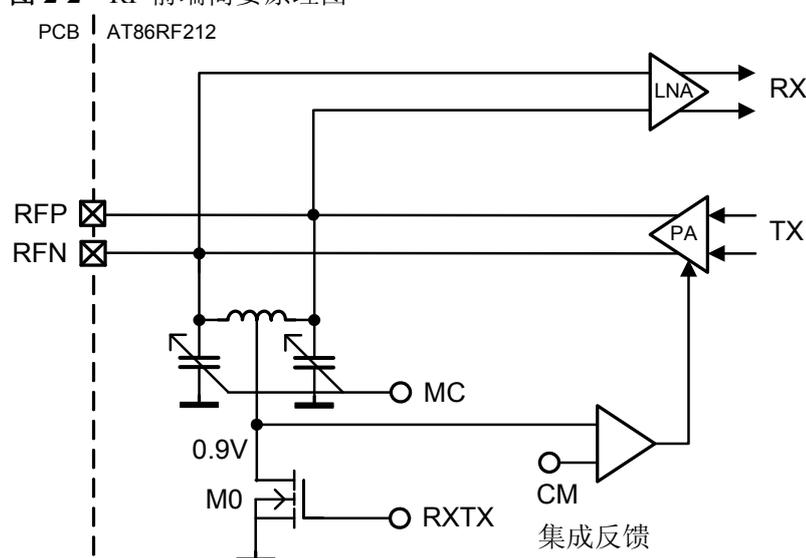
RFN,RFP

差分 RF 端口 (RFP/RFN) 提供同相抑制以便抑制内置数字信号处理模块的开关噪声。差分 RF 布线通过减少由微控制器等其他数字集成电路发出的散杂发射保证电路板电平的高度接收器灵敏度。

RF 端口设计用于 $100\ \Omega$ 差分负荷。允许 RF 引脚间的直流通路。不允许将直流通路截至接地端或电源电压。因此,当连接 RF 负荷时,若将直流通路截至电源或接地端,则需要交流耦合(如表 2-2 所示)。

图 2-2 中显示了 RF 前端的简要原理图。

图 2-2 RF 前端简要原理图



RF 接口直流电压值取决于操作状态,请参考第 5 章。在收发器关闭状态下,当模拟前端不可用时(参看 5.1.2.3 小节),RF 引脚被拉至接地端,以避免发生内部电路不允许的浮动电压超过 1.8V 的情况。

在发送模式中,控制环路提供同相 0.9V 电压。晶体管 M0 关闭,可将 PA 设置为同相电压。每个引脚的接地同相电容将 $<100\text{pF}$, 以保证同相反馈环路的稳定性。

在接收模式中,当晶体管 M0(参看图 2-2)将电感中心抽头引至接地端,RF 接口为接地端提供低阻抗通路。可在 RF 引脚测量片上电感间 20mV 的直流电压降。

通过各个 RF 引脚(如图 2-2 所示)上的接地可调节电容执行匹配控制(MC)。可通过设置 4 位控制字(寄存器 0x19,RF_CTRL_1)以 15 个步骤更改输入电容。

2.2.1.3 晶体振荡器引脚

XTAL1,XTAL2

XTAL1 引脚是参考振荡器放大器(XOSC)输入,XTAL2 为输出。关于晶体振荡器装置及有关 XTAL1/XTAL2 引脚配置的详细介绍详见 7.7 小节。

当使用外置时钟参看信号,XTAL1 将用作输入引脚。更多详情参看 7.7.3 小节。

2.2.1.4 模拟引脚概览

表 2-2 模拟引脚性能-直流电压值

引脚	电压值与条件	附注
RFP/RFN	$V_{DC}=0.9V$ (BUSY_TX) $V_{DC}=20mV$ (接收状态) $V_{DC}=0mV$ (其他)	各接收器状态的 RFP/RFN 引脚直流电平 若使用带有直流通路接地的天线,则需交流耦合。串联电容与各引脚接地电容必须 $<100pF$ 。
XTAL1/XTAL2	$V_{DC}=0.9V$ 于两个引脚 $C_{PAR}=3pF$ $V_{AC} \leq 1.0V_{pp}$	各接收器状态的 XTAL1/XTAL2 引脚直流电平 引脚寄生电容 (C_{par}) 须被视为晶体的附加符合电容。
DVDD	$V_{DC}=1.8V$ (所有状态, P_ON、睡眠和复位除外) $V_{DC}=0mV$ (其他)	各接收器状态的 DVDD 引脚直流电平 1.8V 电压数字域电源引脚 (电压调节器输出)。输出由 $1\mu F$ 旁路转流。
AVDD	$V_{DC}=1.8V$ (所有状态, P_ON、睡眠、复位和 TRX_OFF 除外) $V_{DC}=0mV$ (其他)	各接收器状态的 AVDD 引脚直流电平 1.8V 电压模拟域电源引脚 (电压调节器输出)。输出由 $1\mu F$ 旁路转流。

2.2.2 数字引脚

AT86RF212 提供数字微处理接口,包括一个 SPI 从器件 (/SEL、SCLK、MOSI 和 MISO) 和附加控制信号 (CLKM、IRQ、SLP_TR、/RST 和 DIG2)。微处理接口于第 4 章详细介绍。

附加数字输出信号 DIG1.....DIG4 用于控制外部模块,即用于天线分集 RF 开关控制或接收/发送指示器,分别参看 9.3 和 9.4 小节。复位之后,引脚连接至数字接地端 (DIG1/DIG2) 或数字接地端 (DIG3/DIG4)。

2.2.2.1 驱动强度设置

可使用寄存器 0x03 (TRX_CTRL_0) 设置所有数字输出引脚 (MISO、IRQ、DIG1、.....、DIG4) 和 CLKM 引脚的驱动强度,参看表 2-3。

表 2-3 数字输出驱动配置

引脚	默认驱动强度	附注
MISO、IRQ、DIG1、.....、DIG4	2mA	可调节至 2mA, 4mA, 6mA 和 8mA
CLKM	4mA	可调节至 2mA, 4mA, 6mA 和 8mA

当使用 2mA 的最低驱动强度配置时,电容负荷应尽可能降低,且不大于 50pF。通常输出驱动强度应调节至可能的最低值,以便保持低电流消耗和低数字信号谐波发射。

2.2.2.2 上拉与下拉配置

拉动电阻内部连接至所有无线电接收器中 P_ON 状态下的数字输入引脚, 参看 5.1.2.1.表 2-4 综述了上拉与下拉配置。

表 2-4 P_ON 状态下的数字输入引脚上拉/下拉配置

引脚	H $\hat{=}$ 上拉, L $\hat{=}$ 下拉
/RST	H
/SEL	H
SCLK	L
MOSI	L
SLP_TR	L

在包括复位在内的所有其他状态下, 均不在数字输入引脚连接上拉或下拉电阻。

2.2.2.3 寄存器说明

寄存器 0x03 (TRX_CTRL_0)

TRX_CTRL_0 寄存器控制数字输出焊盘的驱动电流和 CLKM 时钟速率。

表 2-5 寄存器 0x03 (TRX_CTRL_0)

位数	7	6	5	4
名称	PAD_IO	PAD_IO	PAD_IO_CLKM	PAD_IO_CLKM
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	1

位数	3	2	1	0
名称	CLKM_SHA_SEL	CLKM_CTRL	CLKM_CTRL	CLKM_CTRL
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	1	0	0	1

• 7: 6 位-PAD_IO

寄存器位数设定数字输出焊盘的输出驱动电流, CLKM 除外。

表 2-6 数字输出驱动强度

寄存器位数	值	说明
PAD_IO	<u>0</u> ⁽¹⁾	2mA
	1	4mA
	2	6mA
	3	8mA

附注: 1. 加下划线值为复位设置。

• 5: 4 位-PAD_IO_CLKM

寄存器位数设定 CLKM 的输出驱动电流。也请参考 7.7 小节。

表 2-7 CLKM 驱动强度

寄存器位数	值	说明
PAD_IO_CLKM	0	2mA
	1	4mA
	2	6mA
	3	8mA

• 3 位-CLKM_SHA_SEL

参考 7.7 小节。

• 2: 0 位-CLKM_CTRL

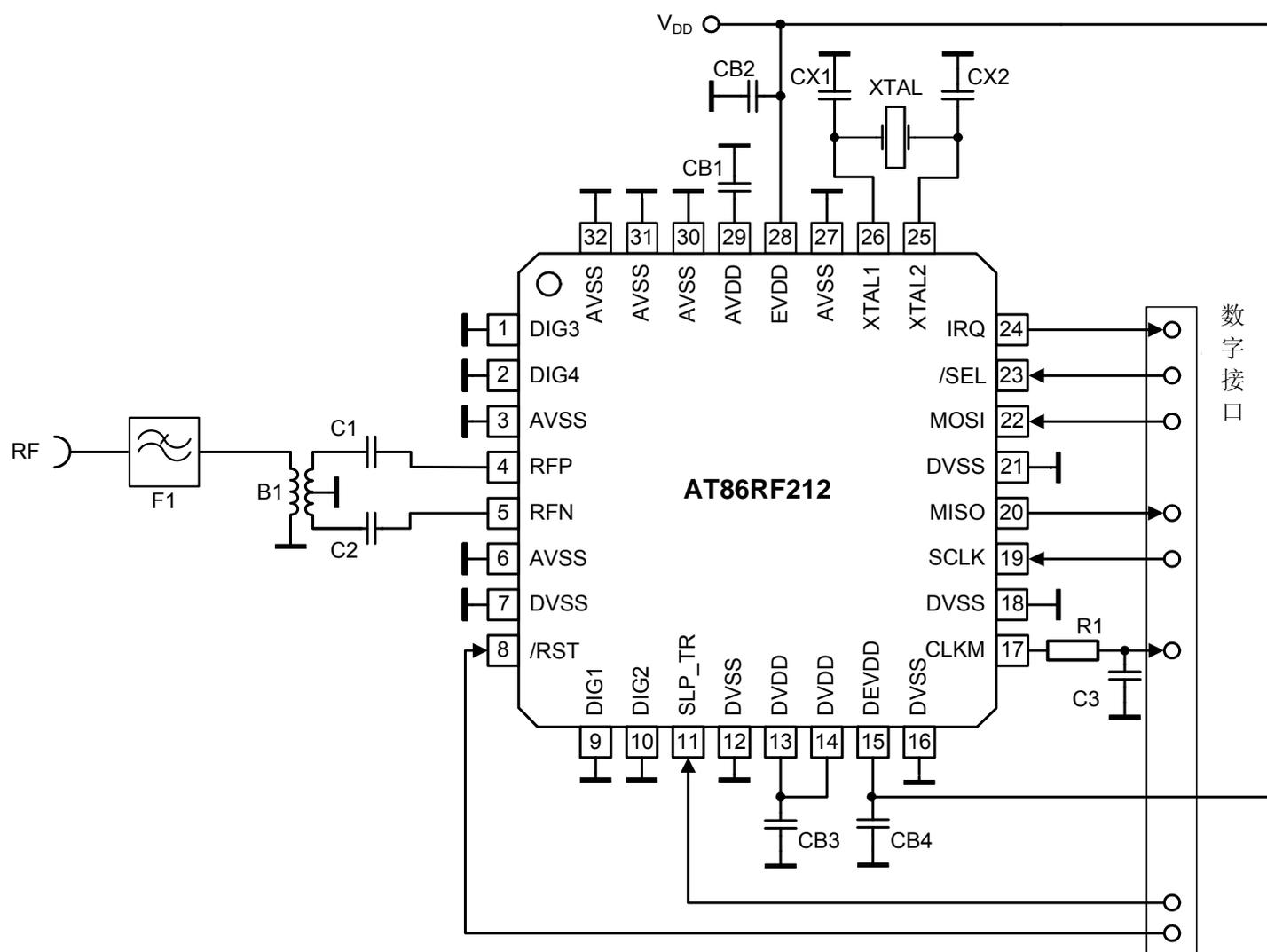
参考 7.7 小节。

3. 应用电路

3.1 基本应用原理图

图 3-1 显示了带有单端 RF 连接器的 AT86RF212 基本应用原理图。使用平衡不平衡转换器 B1 将 50 Ω 单端 RF 输入被转换为 100 Ω 差分 RF 端口阻抗。电容器 C1 和 C2 为 RF 端口提供 RF 输入的交流电藕。视使用的发送功率电平而定, 依 FCC47 第 15.247 小节、ERC/REC70-03 或 ETSI EN 300 220 等规范规则的要求可能需要一个外置滤波器 F1。

图 3-1 基本应用原理图



电源旁路电容 (CB2, CB4) 连接至外置模拟电源引脚 (EVDD, 引脚 28) 和外置数字电源引脚 (DEVDD, 引脚 15)。电容 CB1 和 CB3 是集成模拟和数字电源调节器的旁路电容器, 用以保证稳定操作。所有旁路电容应安置于尽可能

靠近引脚的位置，并应有低电阻、低电感接地连接，以实现最佳性能。

晶体 (XTAL)，两个负荷电容 (CX1,CX2) 和与引脚 XTAL1 和 XTAL2 连接的内部电路形成晶体振荡器。为了实现 RF 的最佳精度与稳定性，应避免较大的寄生电容产生。晶体导线路径应尽可能缩短，且不得靠近数字 I/O 信号。高数据传输速率模式特别要注意此点，参看 7.1.4 小节。晶体引脚或 RF 引脚上的数字信号发出的串扰可能减弱系统性能。因此，低通滤波器 (C3,R1) 置于靠近 CLKM 输出引脚的位置，以减少 CLKM 信号的谐波发射。若 CLKM 引脚不用作微处理时钟源，则不需依从此要求。在这种情况下，在装置初始化的过程中应关闭输出。

应用板地发面应被分为 4 个独立的部分，模拟，数字，天线和 XTAL 地发面。裸露焊盘将被用作独立接地端参考点。

表 3-1 基本应用原理图物料清单 (BoM) 范例

元件名称	说明	值	制造商	型号	附注
B1	SMD 平衡不平衡转换器	900MHz	Wuerth JTI	748431090 0900BL18B100	
F1	SMD 低通滤波器	900MHz	Wuerth JTI	748131009 0915LP15A026	
B1+F1	平衡不平衡转换器/滤波器组合	900MHz	JTI	0892FB15A0100	
CB1, CB3	LDO VREG 旁路电容	1 μ F	AVX Murata	0603YD105KAT2A GRM188R61C105KA12D	X5R 10% 16V (0603)
CB2, CB4	电源旁路电容	1 μ F			
CX1, CX2	晶体负荷电容	12 pF	AVX Murata	06035A120JA GRP1886C1H120JA01	COG 5% 50V (0603)
C1, C2	RF 耦合电容	68 pF	Epcos Epcos AVX	B37930 B37920 06035A680JAT2A	COG 5% 50V (0402 or 0603)
C3	CLKM 低通滤波器电容	2.2 pF	AVX Murata	06035A229DA GRP1886C1H2R0DA01	COG \pm 5 pF 50V (0603) 设计用于 $f_{CLKM}=1MHz$
R1	CLKM 低通滤波器电阻	680 Ω			设计用于 $f_{CLKM}=1MHz$
XTAL	晶体	Cx-4025 16 MHz SX-4025 16 MHz	ACAL Taitien Siward	XWBBPL-F-1 A207-011	

3.2 扩展功能组应用原理图

用于使用扩展功能

- 天线分集
 - 接收/发送指示器
 - 接收器帧时间戳
- 需要扩展应用原理图。

使用 DIG1/DIG2 引脚⁽¹⁾

使用 DIG3/DIG4 引脚

使用 DIG2 引脚

第 9.3 小节

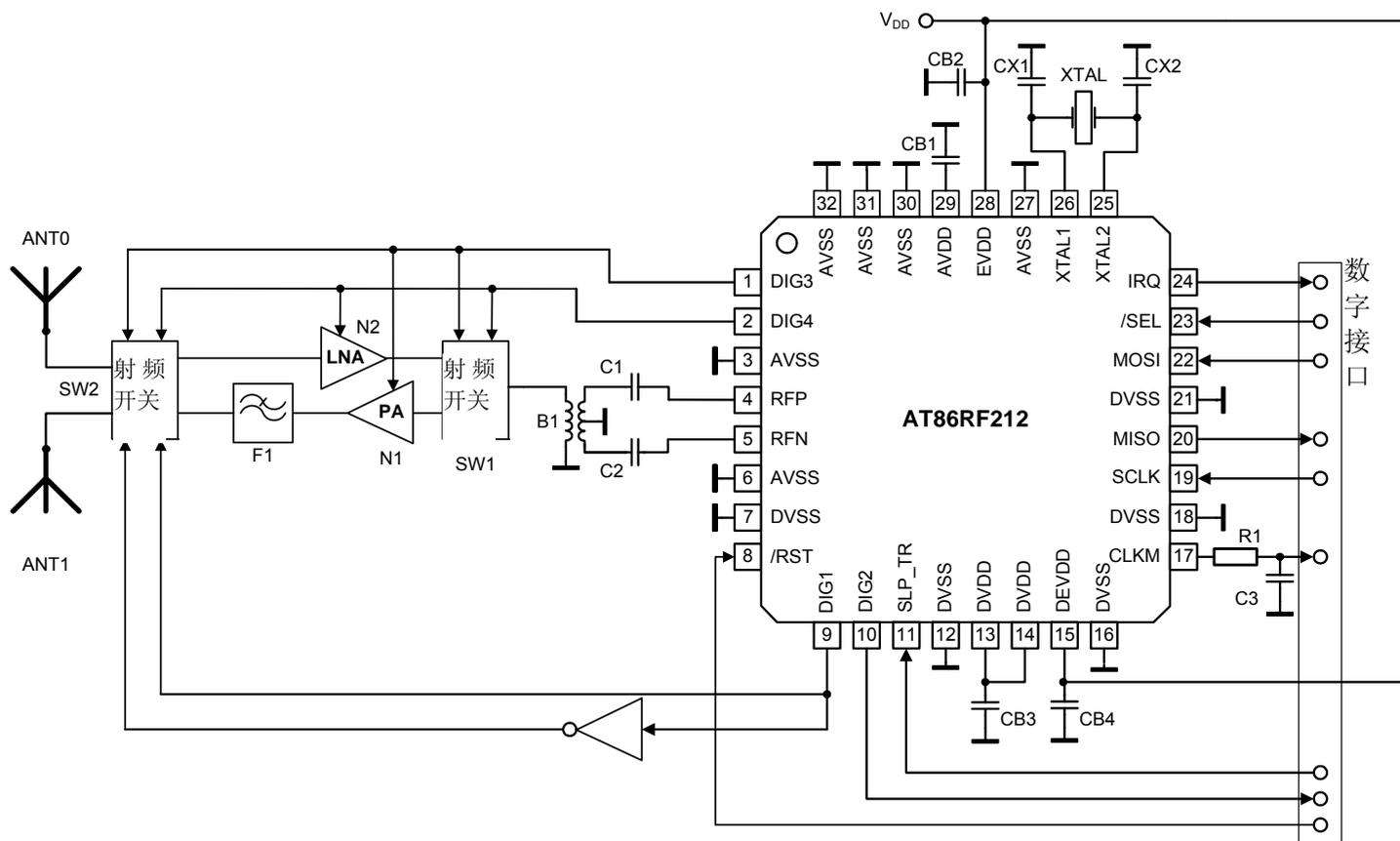
第 9.4 小节

第 9.5 小节

所有其他扩展功能（参看第 9 小节）无须扩展原理图。

扩展功能组应用原理图说明了 AT86RF212 的扩展功能组，如图 3-2 所示。虽然此例显示了所有附加硬件功能组合，但是仍可单独使用各个功能或将几项不同的功能结合使用。

图 3-2 扩展功能应用原理图



在此例中，与基本应用原理图类似，平衡不平衡转换器（B1）将差分无线电收发器 RF 引脚（RFP/RFN）转换为单端 RF 信号；参看图 3-1。RF 开关（SW1,SW2）分离外置 RF 前端的发送与接收通路。

通过接收/发送指示器，由差分引脚对 DIG3/DIG4 表示，负责控制上述开关，参看 9.4 小节。

在接收过程中，相应微控制器可运用天线分集算法或已存储的链路信号质量统计数据搜索可靠的 RF 信号通路。天线分集 RF 开关（SW2）控制引脚 DIG1⁽¹⁾ 选定天线，RF 信号经选配低噪声放大器（N2）放大，然后通过第二接收/发送开关（SW1）送至无线电收发器。

在发送过程中，AT86RF212 发送信号经外置 PA（N1）扩大及低通滤波后，抑制散杂谐波发射并通过 RF 开关（SW2）发送至天线。在此例中，RF 开关 SW2 还可通过引脚 DIG1⁽¹⁾ 支持受控的天线分集。

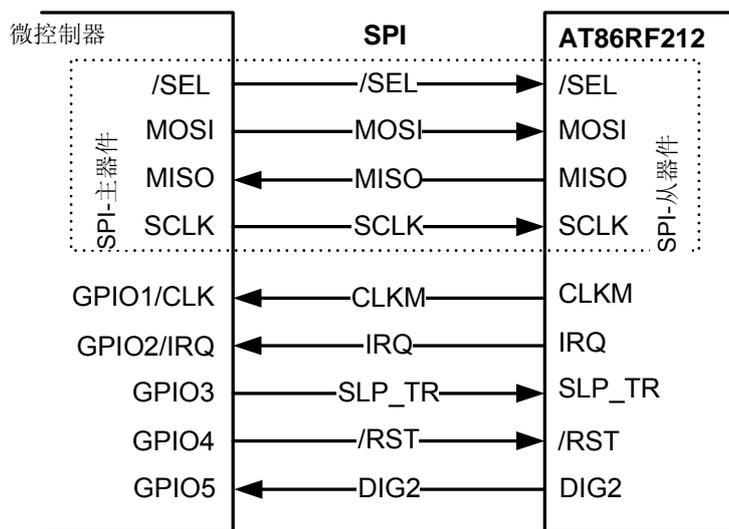
附注：1.若未使用接收帧时间戳，则 DIG1/DIG2 可用作控制 RF 开关的差分引脚对，请分别参看 9.3 小节和 9.5 小节。

4. 微控制器接口

4.1 概览

本节介绍了 AT86RF212 的微控制器接口。接口由 SPI 从器件和附加控制信号组成；参看图 4-1。SPI 时序与协议将在下文进行介绍。

图 4-1 截至 AT86RF212 接口的处理器



ATMEL AVR 系列产品等带有主 SPI 的微控制器可直接与 AT86RF212 连接。SPI 接口用于连接寄存器、帧缓冲、SRAM 及 AES 接口。附加控制信号由微控制器的接口 GPIO/IRQ 控制。

表 4-1 列出了各个无线电收发器 I/O 信号及其功能。

表 4-1 微控制器接口信号说明

信号	说明
/SEL	SPI 信号选择，低可用
MOSI	SPI 数据（主输出从输入）信号
MISO	SPI 数据（主输入从输出）信号
SCLK	SPI 时钟信号
CLKM	时钟输出，参看 7.7.4 小节，可用作： -微控制器时钟源 -高精度时序参考 -MAC 计时器参考
IRQ	中断请求信号，还可用作： -帧缓冲空余空间指示器，参看 9.6 小节
SLP_TR	多功能控制信号，参看 4.6 小节： -睡眠/唤醒 -发送启动 -禁用/启用 CLKM

信号	说明
/RST	AT86RF212 复位信号，低可用
DIG2	多功能控制信号，其中包括一个帧接收信号，参考图 9.5。

4.2 SPI时序介绍

引脚 17(CLKM)可用作微控制器主时钟源。若微控制器自 CLKM 直接获得 SPI 主时钟 (SCLK)，则 SPI 以同步模式运行，反之，则将以异步模式运行。

在同步模式下，SCLK 最高频率为 8MHz。

在异步模式下，SCLK 最高频率仅限 7.5MHz。引脚 CLKM 的信号无须获得 SCLK，并可将其禁用，以降低功耗和散杂发射。

图 4-2 和图 4-3 显示了 SPI 时序并列出其参数。在第 10.4 小节中，对相应时序参数定义 t_1 - t_9 进行了设定。

图 4-2 SPI 时序，总图及时序参数 t_5 , t_6 , t_8 及 t_9 定义。

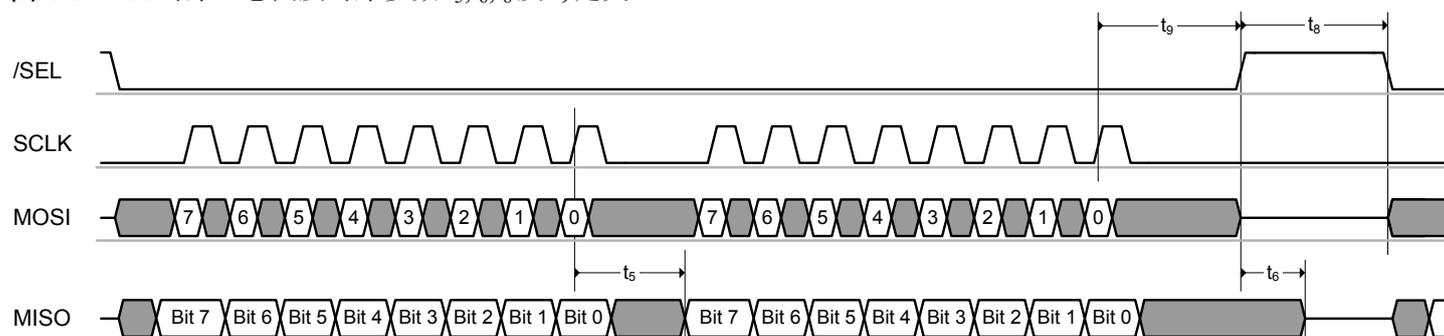
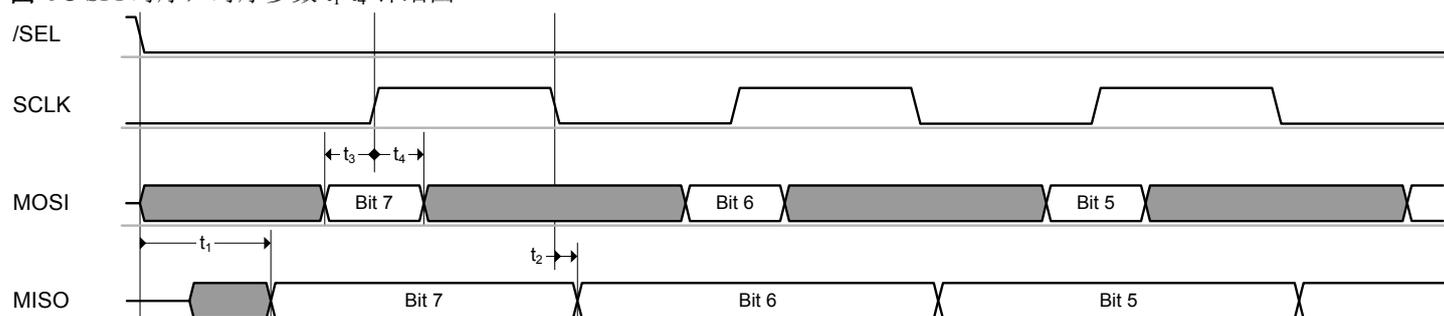


图 4-3 SPI 时序，时序参数 t_1 - t_4 详细图



SPI 基于面向字节协议，是在主器件和从器件之间的双向通信。SPI 主器件确定 /SEL=L，启动传输。然后，主器件生成 8 轮 SPI 时钟循环，以便将一个字节传输至无线电收发器（通过 MOSI）。与此同时，从器件（通过 MISO）向主器件发送一个字节。当主器件要自从器件接收一字节数据时，必须也向从器件发送一字节。所有字节传输均先经 MSB 进行。发出 /SEL=H 的指令即可终止 SPI 传输。

/SEL=L 启用 AT86RF212 的 MISO 输出驱动。MISO 的 MSB 在 t_1 后生效(参看 10.4 小节, 参数 10.4.3)并于 SCLK 的各个下降沿更新。若驱动不可用, 则无内置上拉电阻与之连接。

必须在主器件或外置上拉电阻的保证下, 方可驱动适当的信号电平。请注意, 当/SEL 和/RST 均可用时, MISO 输出驱动器也被激活。

于 SCLK 信号上升沿进行 MOSI 抽样, 并将输出设置于 SCLK 下降沿, 参看图 4-2 和图 4-3。在 SCLK 上升沿前后 (即, t_3 和 t_4 设定的时间) 的信号须保持稳定, 参看 10.4 小节, 参数 10.4.5 和 10.4.6。

SPI 操作模式通常称作 “SPI 模式 0”。

4.3 SPI协议

SPI 时序从通过带有 MSB 的 MOSI (参看表 4-2) 由 SPI 主器件传输第一个命令字节开始。命令字节决定了 SPI 的访问模式和其他模式附属信息。

表 4-2 SPI 命令字节定义

第 7 位	第 6 位	第 5 位	第 4 位	第 3 位	第 2 位	第 1 位	第 0 位	访问模式	访问类型
1	0	寄存器地址[5: 0]						寄存器访问	读取访问
1	1	寄存器地址[5: 0]							写入访问
0	0	1	预留					帧缓冲访问	读取访问
0	1	1	预留						写入访问
0	0	0	预留					SRAM 访问	读取访问
0	1	0	预留						写入访问

各 SPI 将复位字节送回 MISO 上的 SPI 主器件。首字节的内容为 PHY_STATUS 字段, 参看 4.4 小节。

在图 4.4 至图 4.14 及以下各章中以 XX 开头的 MOSI 逻辑值被无线电收发器忽略, 但需要一个有效逻辑电平。微控制器忽略 MISO 上以 XX 开头的复位值。

下列各节介绍了不同的访问模式。

4.3.1 寄存器访问模式

寄存器访问模式是以/SEL=L 起始的双字节读取/写入操作。MOSI 上的第一个传输字节是由一个标示位 (第 7 位=1), 一个读取/写入选择位 (第 6 位) 和一个 6 位寄存器地址组成的命令字节。

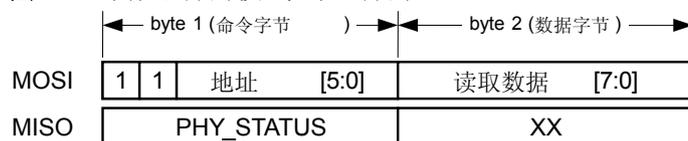
在读取访问中, 所选寄存器地址内容将于 MISO 的第二个字节内复位 (参看图 4-4)。

图 4-4 寄存器访问模式-读取访问



附注： 1.可为各 SPI 访问指定 MISO 上的复位 PHY 状态信息（PHY_STATUS），参看 4.4 小节。
 在写入访问中，传输至 MOSI 的第二个字节含有发送至所选地址的写入数据（参看图 4-5）。

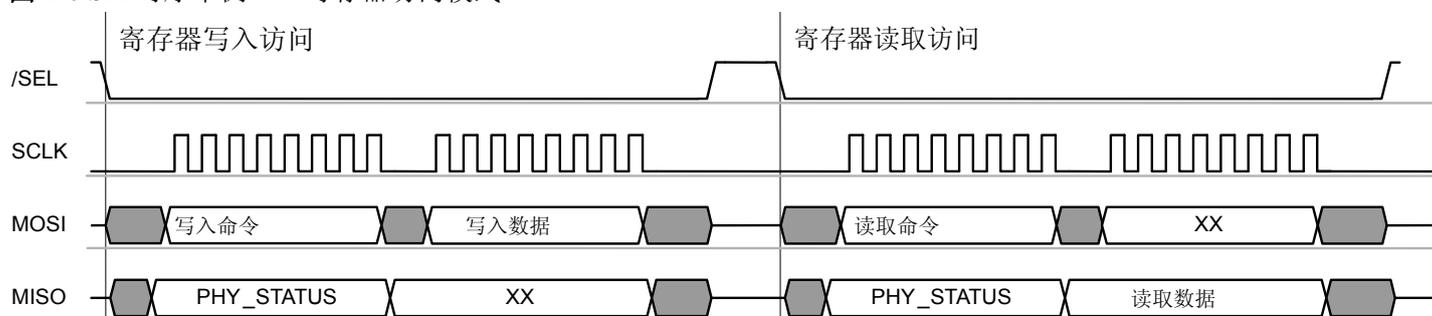
图 4-5 寄存器访问模式-写入访问



各寄存器访问必须以/SEL=H 结尾。

图 4-6 分别显示了寄存器访问时序的典型 SPI 时序。

图 4-6 SPI 时序举例——寄存器访问模式



4.3.2 帧缓冲访问模式

128 字节帧缓冲可一次容纳一个符合 IEEE802.15.4 标准规定的最长接收或发送帧的 PHY 服务数据单元（PSDU）数据。有关帧缓冲的详细介绍见于 7.4 小节。有关 IEEE802.15.4 标准的帧格式介绍见于 6.1 小节。

帧缓冲读取和写入模式用于从/向帧缓冲读取或写入帧数据(PSDU 和其他信息)。访问均以/SEL=L 起始，加 MOSI 命令字节。若字节指定了帧读取或写入访问，则下一个 PHR 字节指出帧长度及 PSDU 数据，参看图 4-7 和图 4-8。

在帧缓冲读取访问中，PHY 字节头（PHR）和 PSDU 经 MISO 从第二个字节开始传输。在 PSDU 数据之后，还将传输三条字节，其内容分别为接收帧的链路质量指示（LQI）值，能量监测（ED）值和状态信息（RX_STATUS）。图 4-7 列出了帧缓冲读取访问的数据包结构。RX_STATUS 结构如表 4-3 所示。

图 4-7 数据包结构-帧读取访问



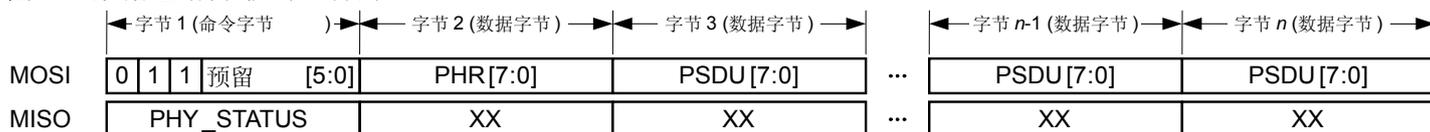
表 4-3 RX_STATUS

位	7	6	5	4
寄存器	0x06, PHY_RSSI[7]		0x02, TRX_STATE[7:5]	
名称	RX_CRC_VALID		TRAC_STATUS	
小节	6.3.5		5.2.6	
位	3	2	1	0
寄存器	预留			
名称	预留			

请注意，帧缓冲读取访问可随时终止无须任何/SEL=H 的设置，例如，可在读取帧长度字节之后立即终止。后续的帧缓冲读取操作由 PHR 字段重新开始。

在帧缓冲写入访问中，MOSI 上传输的第二个字节由帧长度 (PHR 字段)，加有效载荷数据 (PSDU) 组成，如图 4-8 所示。

图 4-8 数据包结构-帧写入访问



以下列方法计算一个帧缓冲访问的 n 字节数：

读取访问： $n=5+\text{帧_长度}$

[PHY_STATUS, PHR, PSDU 数据, LQI, ED 及 RX_STATUS]

写入访问： $n=2+\text{帧_长度}$

[命令字节 PHR, 及 PSDU 数据]

帧_长度最大值为 127 字节。这意味着 帧缓冲读取访问的 $n \leq 132$ ，而帧缓冲写入访问的 $n \leq 129$ 。

每次数据字节的读取或写入均会使帧缓冲的地址计数器自动增长，直至访问由/SEL=H 结束。

图 4-9 和图 4-10 列出了读取一个 2 字节 PSDU 帧和写入一个 4 字节 PSDU 帧的缓存器访问 SPI 序列示例。

图 4-9 SPI 时序示例-2 字节 PSDU 帧的缓存器读取

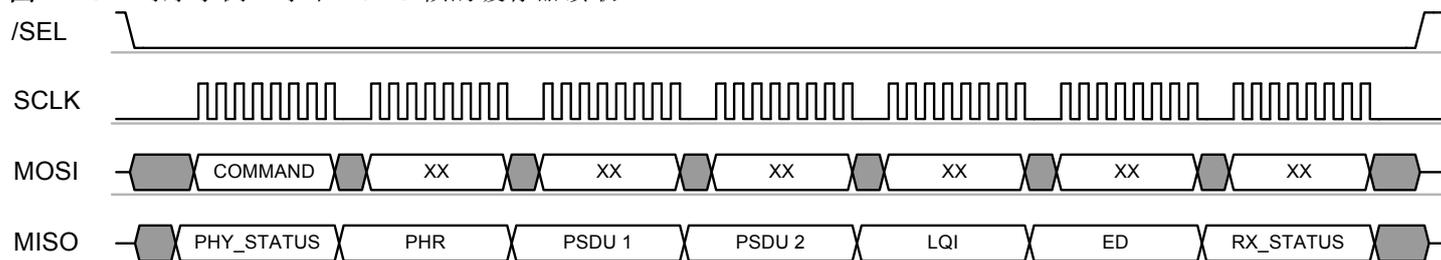
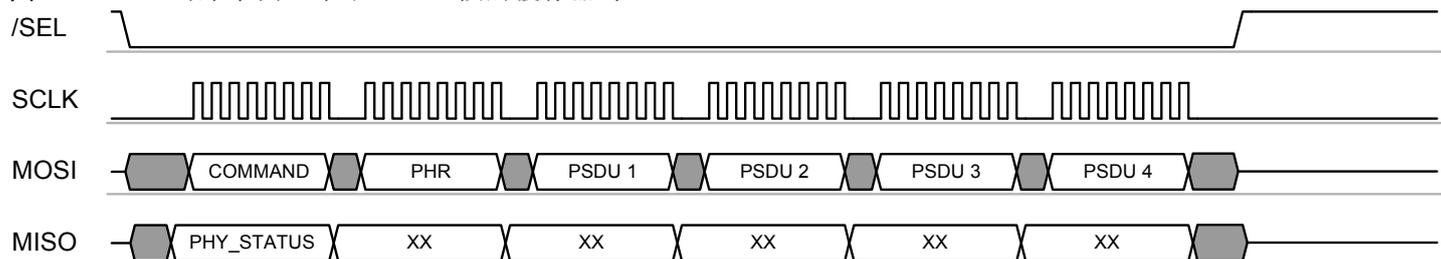


图 4-10 SPI 时序示例-4 字节 PSDU 帧的缓存器写入



中断请求 IRQ_6(TRX_UR)指出在帧缓冲读取或写入访问过程中发生的访问冲突。更多详情参看 7.4 小节。

附注

- 发送和接收共用帧缓冲；因此，新输入帧会将帧数据覆盖。若发送帧数据须重传，必须保证与此同时未收到任何帧。
- 为了避免接收将其覆盖，可启用动态帧缓冲保护功能，参看 9.7 小节。
- 扩展操作模式下（TX_ARET）的接收确认帧等例外情况参看 5.2.4 小节。

4.3.3 SRAM 访问模式

SRAM 模式可访问帧缓冲内的指定字节，从而降低 SPI 流量。

在执行 IRQ_2(RX_START)进入帧接收状态之后，SRAM 访问可用于在保留动态帧缓冲保护功能的同时，上载 PHR 字段，参看 9.7。

SRAM 访问均以 /SEL=L 开头。在 MOSI 上传输的第一个字节为命令字节，须按照表 4-2 的定义指出 SRAM 访问模式。后面的字节指出了写入或读取访问的起始地址。无线电收发器或发送操作的地址空间为 0x00 至 0x7F。安全模块（AES）使用的地址空间为 0x82 至 0x94,参看 9.1 小节。

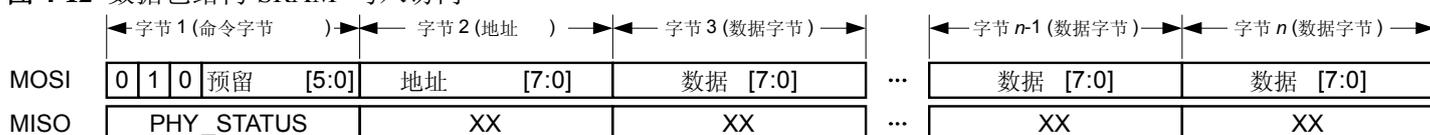
在 SRAM 读取访问中，在 MISO 上从访问时序的第三个字节开始传输一个或多个字节的读取数据（参看图 4-11）。

图 4-11 数据包结构-SRAM 读取访问



在 SRAM 写入访问中, 在 MOSI 上从访问时序的第三个字节开始传输一个或多个字节的写入数据 (参看图 4-12)。请勿试图读取或写入超出 SRAM 缓存器容量的字节。

图 4-12 数据包结构-SRAM 写入访问



在/SEL=L 的情况下, 各后附字节读取或字节写入均会使帧缓冲的地址计数器增长直至 SRAM 访问由/SEL=H 终止。

图 4-13 和图 4-14 列出了 SRAM 访问长度为 5 字节的数据包读取和写入分别对应的 SPI 时序示例。

图 4-13 SPI 时序示例-SRAM 的 5 字节数据包读取访问

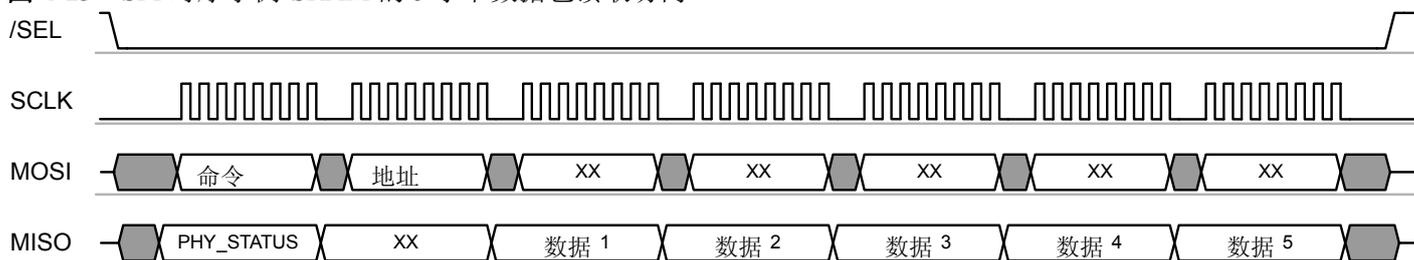
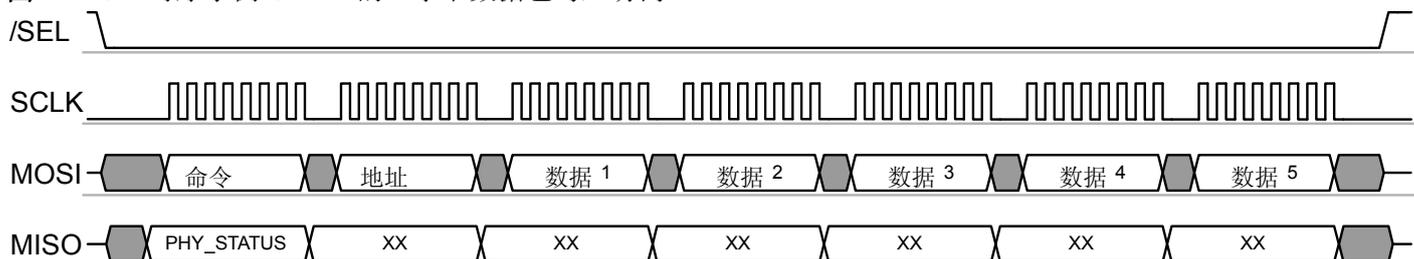


图 4-14 SPI 时序示例-SRAM 的 5 字节数据包写入访问



附注

- SRAM 访问模式并非设计用作帧缓冲访问模式 (参看 4.3.2 小节) 的代替模式。
- 当使用 SRAM 访问模式时, 帧缓冲访问冲突并无 TRX_UR 中断指示, 更多详尽资料见于 7.4.3 小节。

4.4 PHY 状态信息

可通过经 MISO 传输的数据的第一个字节,将各 SPI 访问设置为从无线电收发器 (PHY_STATUS) 到微控制器的返回状态信息。

可通过 SPI_CMD_MODE 位寄存器 (寄存器 0x04, TRX_CTRL_1) 设置无线电收发器状态信息的内容。复位之后, MISO 发送至微控制器的首字节内容被设为 0x00。

4.4.1 寄存器介绍-SPI 控制

寄存器 0x04 (TRX_CTRL_1) :

TRX_CTRL_1 寄存器是用于控制不同操作模式和无线电收发器设置的多功能寄存器。

表 4-4 寄存器 0x04 (TRX_CTRL_1):

位	7	6	5	4
名称	PA_EXT_EN	IRQ_2_EXT_EN	TX_AUTO_CRC_ON	RX_BL_CTRL
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	1	0

位	3	2	1	0
名称	SPI_CMD_MODE	SPI_CMD_MODE	IRQ_MASK_MODE	IRQ_POLARITY
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0

- **第 7 位-PA_EXT_EN**

参看 9.4.3 小节。

- **第 6 位-IRQ2_EXT_EN**

参看 9.5.2 小节。

- **第 5 为-TX_AUTO_CRC_ON**

参看 6.3.5 小节。

- **第 4 位-RX_BL_CTRL**

参看 9.6.2 小节。

- **第 3: 2 位-SPI_CMD_MODE**

各 SPI 将返回字节回传至 SPI 主器件。可使用寄存器 SPI_CMD_MODE 位设置第一个字节的内容。下列状态信息的传输设置如下:

表 4-5 PHY 状态信息

寄存器数位	值	说明
SPI_CMD_MODE	0	默认值 (空白, 所有位均为 0x00)
	1	监控器 TRX_STATUS 寄存器 参看 5.1.5
	2	监控器 PHY_RSSI 寄存器 参看 6.4
	3	监控器 IRQ_STATUS 寄存器 参看 4.7 中断并未清除。

- **第 1 位-IRQ_MASK_MODE**

参看 4.7.2 小节。

• **第 0 位-IRQ_POLARITY**

参看 4.7.2 小节。

4.5 无线电收发器识别

可通过四个寄存器识别 AT86RF212。一个寄存器含有唯一的型号，一个寄存器为对应版本号。其他两个寄存器的内容为 JEDEC 制造商 ID。

4.5.1 寄存器介绍

寄存器 0x1C(PART_NUM):

表 4-6 寄存器 0x1C (PART_NUM)

位	7	6	5	4	3	2	1	0
名称	PART_NUM [7:0]							
读取/写入	R							
复位值	0	0	0	0	0	1	1	1

• **第 7: 0 位- PART_NUM**

本寄存器含有无线电收发器型号。

表 4-7 无线电收发器型号

寄存器位数	值	呈列说明
PART_NUM	7	AT86RF212 的型号

寄存器 0x1D (VERSION_NUM):

表 4-8 寄存器 0x1D (VERSION_NUM)

位	7	6	5	4	3	2	1	0
名称	VERSION_NUM [7:0]							
读取/写入	R							
复位值	0	0	0	0	0	0	0	1

• **第 7: 0 位- VERSION_NUM**

本寄存器含有无线电收发器版本号。

表 4-9 无线电收发器版本号

寄存器位数	值	呈列说明
VERSION_NUM	1	修订版 A

寄存器 0x1E (MAN_ID_0):

表 4-10 寄存器 0x1E (MAN_ID_0)

位	7	6	5	4	3	2	1	0
名称	MAN_ID_0 [7:0]							
读取/写入	R							
复位值	0	0	0	1	1	1	1	1

• 第 7: 0 位- MAN_ID_0

32 位 JEDEC 制造商 ID 的[7: 0]位存储在 MAN_ID_0 位寄存器中。[15: 8]位存储在寄存器 0x1F (MAN_ID_1) 中。ID 的最后 16 位不保存在寄存器中。

表 4-11 JEDEC 制造商 ID-位数[7: 0]

寄存器位数	值	呈列说明
MAN_ID_0	<u>1x1F</u>	Atmel JEDEC 制造商 ID。 32 位制造商 ID 的[7:0 位]: 00 00 00 <u>1F</u>

寄存器 0x1E (MAN_ID_1):

表 4-12 寄存器 0x1F (MAN_ID_1)

位	7	6	5	4	3	2	1	0
名称	MAN_ID_1 [7:0]							
读取/写入	R							
复位值	0	0	0	0	0	0	0	0

• 第 7: 0 位- MAN_ID_1

32 位 JEDEC 制造商 ID 的[15: 8]位存储在 MAN_ID_1 位寄存器中。[7: 0]位存储在寄存器 0x1E (MAN_ID_0) 中。ID 的最后 16 位不保存在寄存器中。

表 4-13 JEDEC 制造商 ID-位数[15: 8]

寄存器位数	值	呈列说明
MAN_ID_1	<u>0x00</u>	Atmel JEDEC 制造商 ID。 32 位制造商 ID 的[15:8 位]: 00 00 <u>00</u> 1F

4.6 睡眠/唤醒与发送信号 (SLP_TR)

引脚 11 (SLP_TR) 为多功能引脚。其功能与 AT86RF212 当前状态相关，总结参看表 4-14。关于无线电收发器的详细介绍参看第 5 节。

表 4-14 SLP_TR 多功能引脚

收发器状态	功能	转换	说明
PLL_ON	发送开始	L→H	开始帧发送
TX_ARET_ON	发送开始	L→H	开始 TX_ARET 转换
BUSY_RX_AACK	发送开始	L→H	在 RX_AACK 卡槽操作的过程中，开始 ACK 发送，参看 5.2.3.5。
TRX_OFF	睡眠	L→H	将无线电收发器调至睡眠状态，CLKM 不可用
SLEEP	唤醒	H→L	将无线电收发器调至 TRX_OFF 状态，电平敏感
RX_ON	不 使用 CLKM	L→H	将无线电收发器调至 RX_ON_NOCLK 状态，CLKM 不可用
RX_ON_NOCLK	使用 CLKM	H→L	将无线电收发器调至 RX_ON 状态，启用 CLKM
RX_AACK_ON	不 使用 CLKM	L→H	将无线电收发器调至 RX_AACK_ON_NOCLK 状态，CLKM 不可用
RX_AACK_ON_NOCLK	使用 CLKM	H→L	将无线电收发器调至 RX_AACK_ON 状态，启用 CLKM

在 PLL_ON 和 TX_ARET_ON 状态下, 引脚 SLP_TR 用作开始发送传输的触发输入。此时, SLP_TR 引脚仅在上升沿敏感。

在无线电收发器的 TRX_OFF, RX_ON 或 RX_AACK_ON 状态下, 经过 SLP_TR 引脚上升沿的状态变化开始之后, 无线电收发器仍保持新状态直至引脚逻辑值升高并由下降沿返回至先前状态。

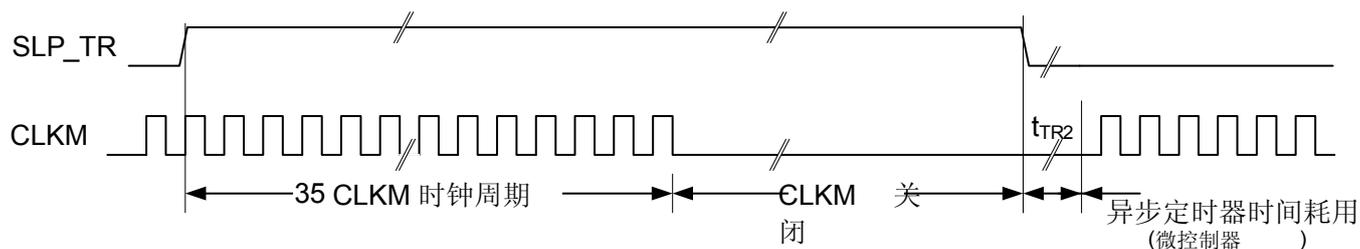
睡眠状态

当无须无线电收发器功能时, 使用睡眠状态, 因此 AT86RF212 掉电, 进而降低总功耗。

掉电模式如图 4-15 所示。当无线电收发器处于 TRX_OFF 的状态时, 微控制器通过设置 SLP_TR=H 强制 AT86RF212 进入睡眠状态。若引脚 17 (CLKM) 为微控制器提供时钟, 则在 35 轮时钟周期之后关闭该时钟, 从而使微控制器可以同步模式完成掉电程序并避免死锁状态。当微控制器发出引脚 SLP_TR 的指令时, AT86RF212 唤醒。这一设计在可能的条件下将功耗降到最低。

CLKM_CTRL 的 CLKM 时钟频率设置的值 6 和 7 并非为微控制器直接时钟设计。当使用上述时钟频率时, 在进入睡眠状态时, CLKM 立即关闭。

图 4-15 异步微控制器定时器启动睡眠与唤醒模式



附注: 时序图 t_{TR2} 请参看表 5-1.

RX_ON 与 RX_AACK_ON 状态

在同步系统中, 如将 CLKM 用作微控制器时钟源, 且 SPI 主时钟 (SCLK) 直接源自 CLKM, 那么 AT86RF212 可支持接收运行状态的其他掉电模式 (RX_ON 及 RX_AACK_ON)。

如果输入帧已预知, 且没有其他应用在微控制器上运行, 则可在不丢失输入帧的同时实施掉电模式。

可通过 SLP_TR 引脚的上升沿关闭 CLKM。然后无线电收发器状态分别由 RX_ON 变为 RX_AACK_ON (扩展操作模式), RX_ON_NOCLK 或 RX_AACK_ON_NOCLK。

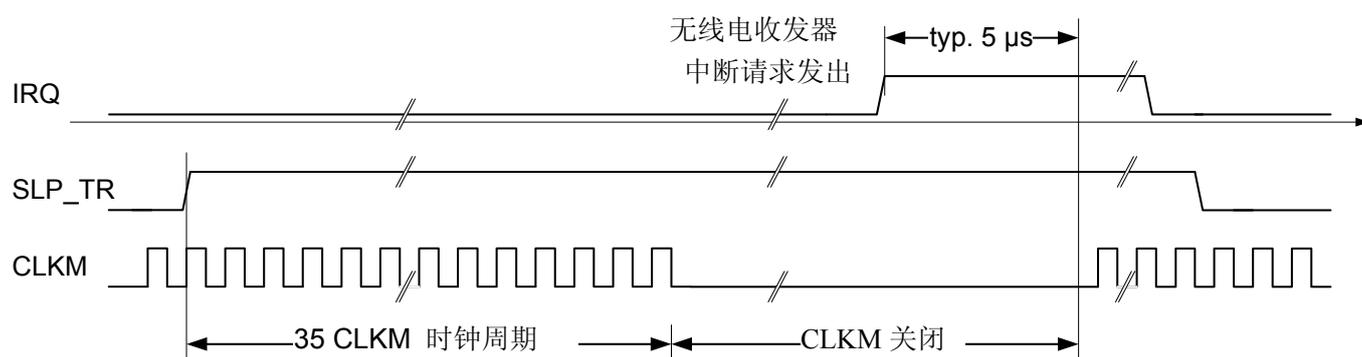
在接收帧时 (如, IRQ_2(RX_START)指示的中断) 时钟输出 CLKM 将自动重新启动。

此场景如图 4-16 所示。在 RX_ON 状态中, 当设置为引脚 SLP_TR=H, 引脚 17 (CLKM) 的时钟在 35 轮时钟周期后关闭。

CLKM_CTRL 的 CLKM 时钟频率设置的值 6 和 7 并非为微控制器直接时钟设计。当使用上述时钟频率时，在分别进入 RX_ON_NOCLK 和 RX_AACK_ON_NOCLK 状态之后，CLKM 立即关闭。

在 RX_(AACK)_ON_NOCLK 和 RX_(AACK)_ON 状态中，无线电收发器电流消耗相等。但是，驱动引脚 17 (CLKM) 要求的电流可降低 RX_(AACK)_ON_NOCLK 的电流消耗。

图 4-16 无线电收发器中断启动唤醒模式



4.7 中断逻辑

4.7.1 概览

AT86RF212 支持在表 4-15 中列出的 8 种中断请求。通过在中断屏蔽寄存器 0x0E (IRQ_MASK) 帧相应位进行设置激活各个中断。在单片机内部，每个待定中断均存储在一个单独的中断状态寄存器位上。所有中断事件均或合并至一个单独的外部中断信号 (IRQ, 引脚 24)。如果发出中断请求 (pin IRQ=H)，微控制器将读取中断状态寄存器 0x0F (IRQ_STATUS) 以判断中断源。对该寄存器的读取访问将清除中断状态寄存器和 IRQ 引脚。

当事件使中断归零时，将不再自动清除中断。IRQ_0 (PLL_LOCK) 和 IRQ_1 (PLL_UNLOCK) 例外，因为其中一个的发生事件会将另一个清除。

基本操作模式支持的中断总结参见表 4-15。

中断请求名称	说明	小节
IRQ_7 (BAT_LOW)	显示程序设定极限下的电源电压。	7.6.4
IRQ_6 (TRX_UR)	显示帧缓冲的访问冲突。	7.4.3
IRQ_5 (AMI)	显示地址匹配。	6.2
IRQ_4 (CCA_ED_DONE)	多功能中断： 1. AWAKE_END： • 指示无线电收发器由在 P_ON 结束时进入 TRX_OFF 状态 ⇨ TRX_OFF 及由睡眠状态 ⇨ TRX_OFF 状态的转换 2. CCA_ED_DONE： • 指示 CCA 或 ED 测量结束	5.1.2.3 6.6.4

IRQ_3 (TRX_END)	RX: 指示帧接收完成。 TX:指示帧发送完成。	5.1.3
IRQ_2 (RX_START)	指示 PSDU 接收的开始。状态由 TRX_STATE 变为 BUSY_RX, PHR 可用于读取帧缓冲。	5.1.3
IRQ_1 (PLL_UNLOCK)	指示 PLL 未锁定。如果无线电收发器处于 BUSY_TX/BUSY_TX_ARET 状态时, PA 立即关闭。	7.8.5
IRQ_0 (PLL_LOCK)	指示 PLL 锁定。	7.8.5

表 4-15 基本操作模式中的中断描述

中断请求 IRQ_4 在不同的当前无线电收发器状态下有两重不同的含义, 请参看寄存器 0x01(TRX_STAT

在 P_ON, 睡眠, 或复位之后, 无线电收发器在进入 TRX_OFF 状态时发出中断请求 IRQ_4(AWAKE_END)。

第二重含义仅适用于接收状态。如果微控制器启动 ED 或 CCA 测量, 那么 IRQ_4(CCA_ED_DONE) 中断请求将指示测量完成, 详情请参看 6.5.4 和 6.6.4 小节。

在 P_ON 或复位之后, 所有中断请求均不可用。在无线电收发器初始化的过程中, 建议启用 IRQ_4(AWAKE_END) 以便在进入 TRX_OFF 状态时, 获得通知。请注意由于寄存器 0x0E(IRQ_MASK) 复原将屏蔽所有中断请求, 在收发器复位后进入 TRX_OFF 状态时, AWAKE_END 中断请求通常不可见。在此情况下, 通常在微控制器修改寄存器之前进入 TRX_OFF 状态。

关于扩展操作模式中的中断处理详见于 5.2.5 小节。

如果设置了寄存器 IRQ_MASK_MODE 位 (寄存器 0x04, TRX_CTRL_1), 那么即使中断请求本身被屏蔽, 也可以从 IRQ_STATUS 寄存器读取中断事件, 参看图 4-18。但是, 在此情况下不能提供该中断请求的时序信息。

可通过 IRQ_POLARITY 寄存器 (寄存器 0x04, TRX_CTRL_1) 设置 IRQ 引脚极性。默认行为的可用性高, 这意味着引脚 IRQ=H 发出了中断请求。

如果“帧缓冲空闲指示器”在帧缓冲读取访问的过程中被激活, 那么 IRQ 引脚将有另一种功能, 详情参看 9.6 小节。

有关监控寄存器 IRQ_STATUS 的解决方案 (不清除该寄存器) 敬请参看 4.4 小节。

4.7.2 寄存器介绍

寄存器 0x0E (IRQ_MASK) :

IRQ_MASK 寄存器用于激活或禁用单独的中断请求。如果相应位被设置为 1, 则一个中断请求被激活。在上电程序 (P_ON 状态) 或复位 (RESET 状态) 之后所有中断均被禁用。

表 4-16 寄存器 0x0E(IRQ_MASK):

位	7	6	5	4
名称	MASK_BAT_LOW	MASK_TRX_UR	MASK_AMI	MASK_CCA_ED_DONE
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0

位	3	2	1	0
名称	MASK_TRX_END	MASK_RX_START	MASK_PLL_UNLOCK	MASK_PLL_LOCK
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0

如果启用中断请求，则建议在清除寄存器 0x0F(IRQ_STATUS)的历史记录之前读取该中断状态寄存器。

寄存器 0x0F(IRQ_STATUS):

IRQ_STATUS 寄存器储存待特定中断请求的状态。

表 4-17 寄存器 0x0F(IRQ_STATUS)

位	7	6	5	4
名称	BAT_LOW	TRX_UR	AMI	CCA_ED_DONE
读取/写入	R	R	R	R
复位值	0	0	0	0

位	3	2	1	0
名称	TRX_END	RX_START	PLL_UNLOCK	PLL_LOCK
读取/写入	R	R	R	R
复位值	0	0	0	0

在引脚 24 (IRQ) 获得中断请求信号之后，可通过读取该寄存器识别发出中断请求的来源。对该寄存器的读取访问会复原所有中断位，并清除 IRQ_STATUS 寄存器。

如果设置了寄存器 IRQ_MASK_MODE 位（寄存器 0x04, TRX_CTRL_1），那么即使中断请求本身被屏蔽，也可以从 IRQ_STATUS 寄存器读取中断事件，参看图 4-18。但是，在此情况下不能提供该中断请求的时序信息。

如果设置了寄存器 IRQ_MASK_MODE 位，建议在清除寄存器 0x0F(IRQ_STATUS)的历史记录之前读取该中断状态寄存器。

寄存器 0x04 (TRX_CTRL_1) :

TRX_CTRL_1 寄存器是用于控制不同运行状态和无线电收发器设置的多功能寄存器。

表 4-18 寄存器 0x04(TRX_CTRL_1)

位	7	6	5	4
名称	PA_EXT_EN	IRQ_2_EXT_EN	TX_AUTO_CRC_ON	RX_BL_CTRL
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	1	0

位	3	2	1	0
名称	SPI_CMD_MODE	SPI_CMD_MODE	IRQ_MASK_MODE	IRQ_POLARTITY
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0

• **第 7 位-PA_EXT_EN**

接收/发送指示器，参看 9.4.3 小节

• **第 6 位-IRQ2_EXT_EN**

可由一个引脚单独决定接收帧的时序。如果寄存器位 IRQ_2_EXT_EN 设置为 1，那么与中断请求 IRQ_2(RX_START)相同，PHR 字段的接收直接在引脚 10 (DIG2) 上发出。请注意即使在寄存器 0x0E (IRQ_MASK) 上的相应中断事件 IRQ_2 (RX_START) 屏蔽位被设置为 0 时，该引脚仍然可用。引脚保持高电平直至帧接收流程结束。

更多详情请参看 9.5 小节。

• **第 5 位—TX_AUTO_CRC_ON**

参看 6.3.5 小节。

• **第 4 位—RX_BL_CTRL**

参看 9.6.2 小节。

• **第 3: 2 位—SPI_CMD_MODE**

参看 4.4.1 小节

• **第 1 位—IRQ_MASK_MODE**

AT86RF212 支持中断事件的轮流检测。可通过寄存器 IRQ_MASK_MODE 位激活中断轮流检测。即使中断请求被寄存器 0x0E(IRQ_MASK)相应位屏蔽，寄存器 0x0F(IRQ_STATUS)仍会指示该事件。

表 4-19 IRQ Mask 设置

IRQ_MASK 值	IRQ_MASK_MODE	说明
0	0	完全禁用中断轮流检测而且在 IRQ_STATUS 寄存器中未显示任何中断原因。
0	1	完全禁用中断轮流检测但是在 IRQ_STATUS 寄存器中显示所有中断原因。
≠0	0	向 IRQ 引脚发送所有已激活的中断信号并显示在 IRQ_STATUS 寄存器中。
≠0	1	向 IRQ 引脚发送所有已激活的中断信号而且在 IRQ_STATUS 寄存器中显示所有中断原因。

图 4-17 IRQ_MASK_MODE=0

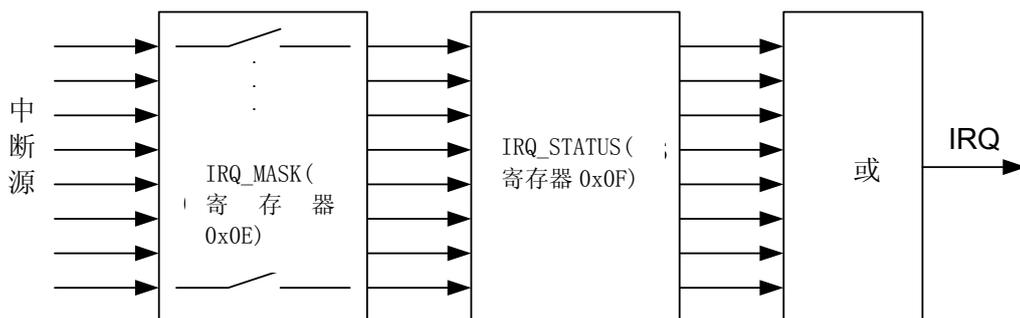
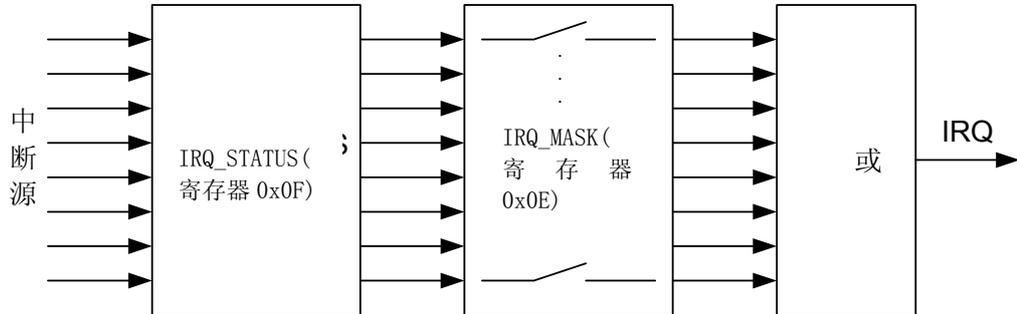


图 4-18 IRQ_MASK_MODE=1



• 第 0 位—IRQ_POLARITY

IRQ 引脚的默认极性为高可用性。可通过寄存器 IRQ_POLARITY 位将其设置为低可用性，参看表 4-20。

表 4-20 引脚 24 (IRQ) 设置

寄存器位	值	说明
IRQ_POLARITY	0	引脚 IRQ 高可用性
	1	引脚 IRQ 低可用性

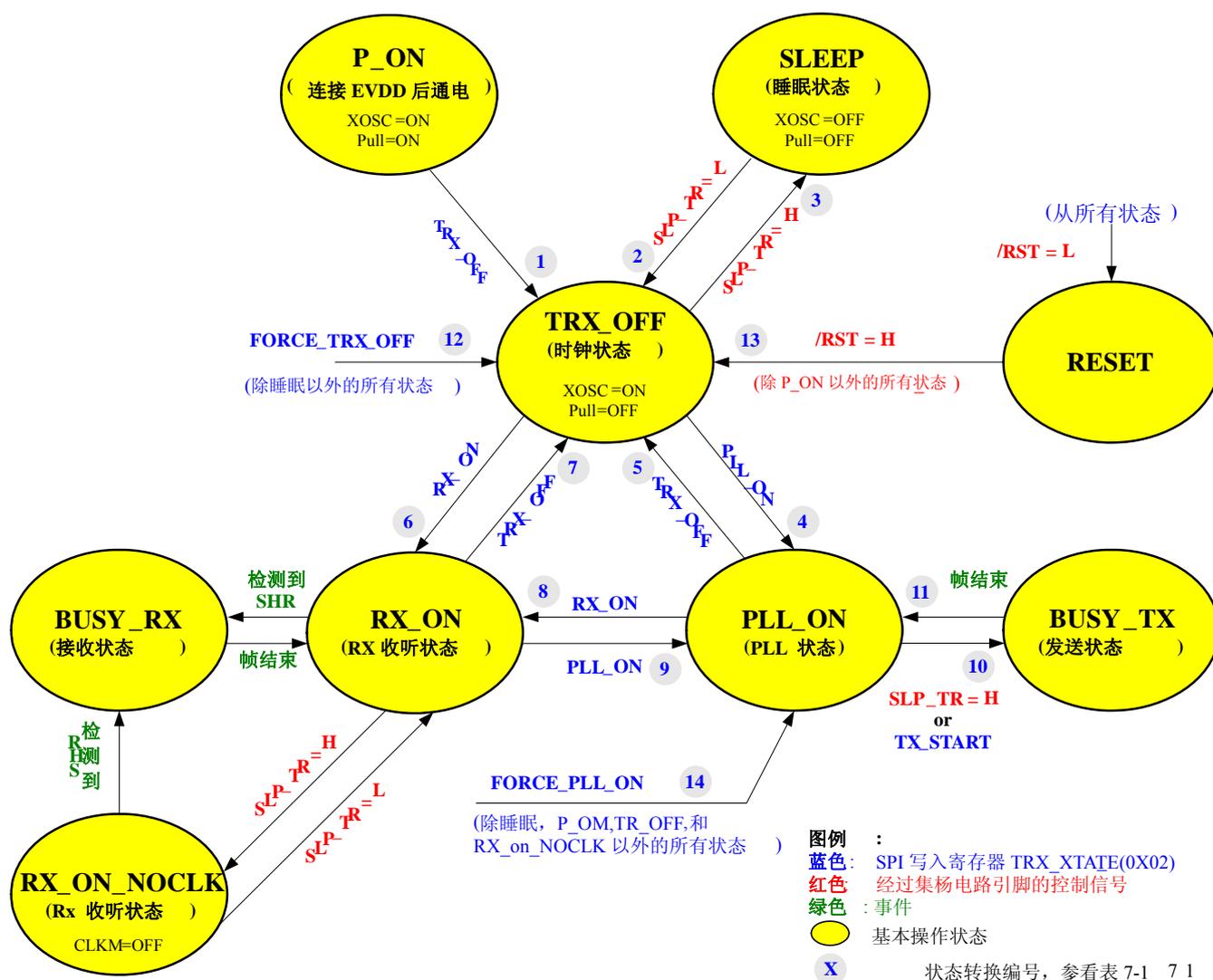
此设置不影响帧缓冲空闲指示器的极性，请参看 9.6 小节。帧缓冲空闲指示器总为高可用性。

5. 操作模式

5.1 基本操作模式

本节总结提供 AT86RF212 所有基本功能的状态，包括接收帧，发送帧，上电程序和睡眠。基本操作模式为 IEEE802.15.4 和 ISM 的应用而设计。相应的无线电收发器状态如图 5-1 所示。

图 5-1 基本操作模式状态示意图 (时序参看表 5-1)



5.1.1 状态控制

可通过在寄存器 TRX_CMD 位(寄存器 0x02, TRX_STATE)写入命令, 或直接从引脚 11 (SLP_TR) 和引脚 8 (/RST) 控制无线电收发器状态。可通过在寄存器 0x01 (TRX_STATUS) 读取无线电收发器状态并检测状态转换是否成功。

如果 TRX_STATUS=0x01F (STATE_TRANSITION_IN_PROGRESS), 则 AT86RF212 处于状态转换的过程中。在无线电收发器处于 STATE_TRANSITION_IN_PROGRESS 状态时, 请勿试图开始其他状态转换。

引脚 SLP_TR 是一个多功能引脚, 请参看 4.6 小节。在不同的无线电收发器状态下, SLP_TR 引脚上升沿可引起以下状态转换:

- TRX_OFF → SLEEP
- RX_ON → RX_ON_NOCLK
- PLL_ON → BUSY_TX

而引脚 SLP_TR 的下降沿可引起下列状态转换:

- SLEEP → TRX_OFF
- RX_ON_NOCLK → RX_ON

引脚 8(/RST)将所有寄存器(寄存器位 CLKM_CTRL 被屏蔽, 详情参看 7.7.4 小节)和删除的 SRAM 内容复原。它迫使无线电收发器处于 TRX_OFF 状态。但是, 如果设备处于 P_ON 状态, 则将保持 P_ON 状态。

在除睡眠状态以外的所有状态下, 状态转换命令 FORCE_TRX_OFF 或 TRX_OFF 将导致转换至 TRX_OFF 状态。若无线电收发器处于可用接收或发送状态时 (BUSY_*), FORCE_TRX_OFF 命令将中断这些可用处理, 并强制立即转换为 TRX_OFF 状态。TRX_OFF 命令由对比存储至可用状态 (接收或发送) 结束。此后执行 TRX_OFF 状态的转换。

可使用 FORCE_PLL_ON 命令, 由接收或有效发送状态开始转换为 PLL_ON 状态。可用处理即被中断。与 FORCE_TRX_OFF 命令相反, 此命令不禁用 PLL 和数字电压调节器 AVREG。在睡眠、复位和所有*_NOCLK 状态下不可使用此命令。

在每个要求的状态转换完成之后, 均需读取寄存器的 TRX_STATUS 位 (寄存器 0x01, TRX_STATUS) 进行确认。

5.1.2 说明

5.1.2.1 P_ON—连接 EVDD 后通电

当外部电源电压 (EVDD) 接至 AT86RF212 后, 无线电收发器进入 P_ON 状态, 执行片内复位。晶体振荡器被激活, 待晶体振荡器稳定后, 引脚 17 (CLKM) 出现默认为 1MHz 的主时钟。CLKM 可用作微控制器的时钟源。SPI 接口和数字电压调节器被启用。

片内上电服务将所有寄存器设为其默认值。引脚 8 (/RST) 上的微控制器专用服务信号不是必须的, 但由于硬件/软件同步化因素仍建议使用。

所有数字输入在 P_ON 状态中均有上拉或下拉电阻, 请参看 2.2.2.2 小节。在通电或服务后如果有 GPIO 信号正在浮动, 则必须支持微控制器。当无线电收发器推出 P_ON 状态时, 输入上拉和下拉电阻不可用。在推出 P_ON 状态后, 输出引脚 DIG1/DIG2 内部连接至数字接地端, 但如无配置变更, 引脚 DIG3/DIG4 则内部连接至模拟接地端。引脚 8 (/RST) 的复位不能启用上拉或下拉电阻。

在推出 P_ON 状态之前，微控制器必须将输入引脚设置为默认运行值：SLP_TR=L,/RST=H 及 /SEL=H。

默认禁用所有中断请求。因此，首先应启用状态转换控制的中断命令，如启用 IRQ_4(AWAKE_END) 以指示状态转换为 TRX_OFF。在 P_ON 状态中，在引脚 17 (CLKM) 出现默认为 1MHz 的主时钟后可先访问无线电收发器寄存器，参看表格 5-1 中的 t_{TR1} 。

在电源电压稳定，晶体振荡器建立之后（参看 10.5 小节参数 t_{XTAL} ），应为 AWAKE_END 设置中断屏蔽。有效的 SPI 对寄存器 TRX_CMD 位（寄存器 0x02,TRX_STATE）进行写入访问，TRX_OFF 或 FORCE_TRX_OFF 命令启动从 P_ON 到 TRX_OFF 的专题转换，然后由 AWAKE_END 中断请求指示此状态转换（如果可用）。

5.1.2.2 SLEEP—睡眠状态

在睡眠状态中，整个无线电收发器均不可用。无电路运行。无线电收发器电流消耗仅剩泄露电流和一个低功耗电压调节器的电流（100nA），以便为内容仍有效的寄存器提供电源电压。只能在 TRX_OFF 中，通过设置 SLP_TR=H 进入此状态。

若启用 CLKM，那么在引脚 11 (SLP_TR) 上升沿之后 35 轮 CLKM 周期后进入睡眠状态。如果 CLKM 输出已关闭（寄存器 0x03 中的 CLKM_CTRL 位=0），则会立即进入睡眠状态。

在 250kHz 的时钟频率和符号时钟频率下（寄存器 0x03，TRX_CTRL_0 的 CLKM_CTRL 值为 6 和 7），引脚 17 (CLKM) 上的主时钟立即关闭。

SLP_TR=L 的设置使无线电收发器返回 TRX_OFF 状态。在睡眠状态下，寄存器内容仍保持有效，而帧缓冲和安全引擎（AES）则被清空。

/RST=L 在睡眠状态下将无线电收发器恢复为 TRX_OFF 的状态，并将所有寄存器设置回默认值。但寄存器 CLKM_CTRL 位除外（寄存器 0x03，TRX_CTRL_0）。上述寄存器位须特殊处理，详情参看 7.7.4 小节。

5.1.2.3 TRX_OFF-时钟状态

在 TRX_OFF 的状态下，晶体振荡器运行，且引脚 17 (CLKM) 上有主时钟可用。SPI 接口和数字电压调节器被启用，因此可访问无线电收发器寄存器，帧缓冲和安全引擎（AES）（参看 7.4 和 9.1 小节）。

与 P_ON 状态相反，上拉和下拉电阻不可用。

请注意在 TRX_OFF 状态下数字前端不可用。如果设置为 TRX_OFF_AVDD_EN（寄存器 0x0C,TRX_CTRL_2），则数字电压调节器开启，可以更快速地切换至任意发送/接收状态。

从 P_ON,睡眠或服务状态进入 TRX_OFF 状态的状态转换有 IRQ_4(AWAKE_END)中断命令指示（如果可用）。

5.1.2.4 PLL_ON—PLL 状态

除非 AVREG 已经开启(寄存器 0x0C,TRX_OFF_AVDD_EN),否则从 TRX_OFF 状态进入 PLL_ON 状态将先开启数字电压调节器 (AVREG)。电压调节器建立之后 (参看表 5.2), PLL 频率合成器启动。当 PLL 被建立为寄存器 CHANNEL 位(寄存器 0x08,PHY_CC_CCA),CC_NUMBER 位(寄存器 0x013,CC_CTRL_0),和 CC_BAND 位(寄存器 0x014,CC_CTRL_1) 定义的信道接收频率时,发出的 IRQ_0(PLL_LOCK)中断请求将指示 PLL 成功锁定。

在 PLL_ON 状态下发出 RX_ON 命令之后,寄存器 TRX_STATUS 位(寄存器 0x01,TRX_STATUS)立即指出无线电处于 RX_ON 状态。但是,只有在 PLL 已锁定之后,才能开始帧接收。

PLL_ON 状态与 IEEE802.15.4 标准中规定的 TX_ON 状态相对应。

5.1.2.5 RX_ON 与 BUSY_RX—RX 收听和接收状态

AT86RF212 在内部将接收模式分为 RX_ON 状态和 BUSY_RX 状态。这两种状态在无线电收发器数字电路方面没有区别,均打开该电路。在两种状态下均可启用接收器和 PLL 频率合成器。

在 RX_ON 状态中,接收器收听输入帧。在检测到有效的同步标头 (SHR) 后,AT86RF212 自动进入 BUSY_RX 状态。非零 PHR 字段接收会生成 IRQ_2(RX_START) (如果可用)。

在 PSDU 接收的过程中,接收帧数据被连续存储在帧缓冲中直至收到最后一个字节。中断请求 IRQ_3(TRX_END)指示帧接收完成,无线电收发器返回 RX_ON 状态。同时,寄存器 RX_CRC_VALID 位(寄存器 0x06,PHY_RSSI)更新为 FCS 检测的结果(参看 6.3 小节)。

收到的帧被传送至地址匹配滤波器,参看 6.2 小节。如果帧的 MAC 寻址字段内容(参看 7.2.1 小节的 IEEE802.15.4 标准)与寻址模式设定要求的寻址匹配,那么将发出 IRQ_5(AMI)地址匹配中断请求,参看 4.7 小节。要求的地址值存储于寄存器 0x20-0x2B 中(短地址, PAN ID 和 IEEE 地址)。在基本操作模式和扩展操作模式中均可使用帧过滤功能,参看 6.2 小节。

只能通过在寄存器 0x02 (TRX_STATE) 的 TRX_CMD 位写入状态转换命令推出 RX_ON。

5.1.2.6 RX_ON_NOCLK—无 CLKM 的 RX 收听状态

如果无线电收发器正在收听一个输入帧,且微控制器并未运行任何应用,那么微控制器可能掉电以减少系统的总功耗。这种时钟同步模式(参看第 4 节)下的系统运行特殊掉电情况是由 AT86RF212 的 RX_ON_NOCLK 状态支持实现的。

只能在无线电收发器的 RX_ON 状态下,通过设置引脚 11 (SLP_TR) =H 进入此状态,参看第 0 章。引脚 17 (CLKM) 在 SLP_TR 引脚上升沿后的 35 轮时钟周期后失效,参看图 4-16。这样,微控制器才能完成其掉电程序。

请注意在 250kHz 的时钟频率和符号时钟频率下（寄存器 0x03，TRX_CTRL_0 的 CLKM_CTRL 值为 6 和 7），在 SLP_TR 上升沿之后，主时钟信号 CLKM 立即关闭。

由指示接收状态的中断请求向微控制器发出帧接收指示。CLKM 在此打开，无线电收发器进入 BUSY_RX 状态（参看 4.6 小节和图 4-16）。当使用 RX_ON_NOCLK 时，应至少有一个指示接收状态的中断请求可用。

在接收交易完成之后，无线电收发器进入 RX_ON 状态。当 SLP_TR 的引脚的下一个上升沿出现时，无线电收发器只能重新进入 RX_ON_NOCLK 状态。

如果 AT86RF212 处于 RX_ON_NOCLK 状态，且引脚 SLP_TR 复位为低逻辑值，那么单片机将进入 RX_ON 状态，并再次开始在 CLKM 引脚上提供时钟。

在 RX_ON_NOCLK 状态下进行复位还需要将引脚 SLP_TR 复位到低逻辑值，否则无线电收发器将直接进入睡眠状态。

附注

- 在 RX_ON_NOCLK 状态下进行复位还需要将引脚 SLP_TR 复位到低逻辑值，否则无线电收发器将直接进入睡眠状态。

5.1.2.7 BUSY_TX—发送状态

只能在 PLL_ON 状态下开始发送。可通过两种方法开始发送：

- 引脚 11 (SLP_TR) 的上升沿
- TX_START 命令写入寄存器 TRX_CMD 位（寄存器 0x02，TRX_STATE）。

上述方法均可使无线电收发器进入 BUSY_TX 状态。

在转换到 BUSY_TX 状态的过程中，PLL 频率变为发送频率。在 1 个符号周期之后（参看 7.1.3 小节）开始 SHR 的第一数据芯片实际发送，以保证 PLL 建立和 PA 上斜坡，参看图 5-6。在 SHR 发送之后，帧缓冲内容被发送。如果 PHR 指出帧长度为零，则在 PHR 字段之后立即终止发送。

在帧发送完成之后，AT86RF212 自动关闭功率放大器，生成 IRQ_3(TRX_END)中断请求，并返回 PLL_ON 状态。

5.1.2.8 复位状态

复位状态用于将设备的状态复原并将 AT86RF212 的所有寄存器恢复到默认值，除寄存器 CLKM_CTRL 位（寄存器 0x03，TRX_CTRL_0）除外。上述寄存器位须特殊处理，详情参看 7.7.4 小节。

复位使无线电收发器进入 TRX_OFF 状态。但是，如果装置处于 P_ON 状态中，则将保持该状态。

通过将引脚/RST 设置为=L 启动复位，并在/RST=H 之后,返回状态。复位脉冲的最小长度如 10.4 小节参数 10.4.13 所述。

在复位状态中，微控制器须将无线电收发器的控制引脚 SLP_TR 和/SEL 设置为其默认值。

寄存器默认值概览见于表 11.2。

5.1.3 中断处理

基本操作模式支持所有 AT86RF212 可用的中断请求（参看表 4-15）。

例如，有中断请求用于查看无线电收发器 RX 和 TX 操作的状态。

当处于接收模式时，IRQ_2(RX_START)指示检测到第一个非零 PHR，IRQ_5(AMI)指示地址匹配，IRQ_3(TRX_END)指示帧接收完成。

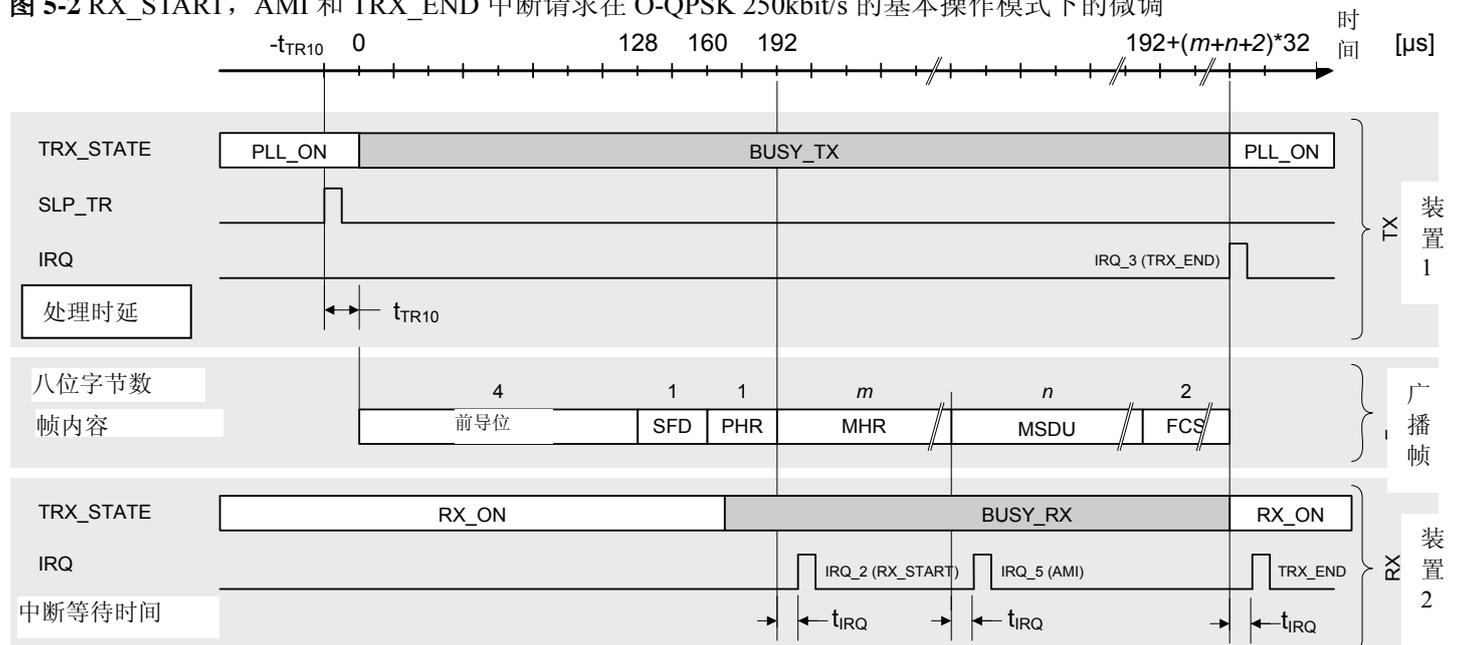
在发送的过程中，IRQ_3(TRX_END)指示帧发送完成。

图 5-2 列出了两台装置间的发送/接收转换示例，以及在基本操作模式中的相关中断事件。装置 1 发生了一个由 MAC 标头，MAC 有效载荷和有效 FCS 组成的帧。IRQ_3(TRX_END)指示帧发送结束。

装置 2 接收此帧，中断请求 IRQ_2(RX_START)指示检测到有效 PHR 字段，IRQ_3(TRX_END)指示帧接收完成。如果帧通过帧滤波器，（参看 6.2 小节）则在 MAC 标头（MHR）接收之后发出 IRQ_5(AMI)中断请求，指示地址匹配。

处理延时 t_{IRQ} 是标准值，参看第 10.4 小节。

图 5-2 RX_START, AMI 和 TRX_END 中断请求在 O-QPSK 250kbit/s 的基本操作模式下的微调



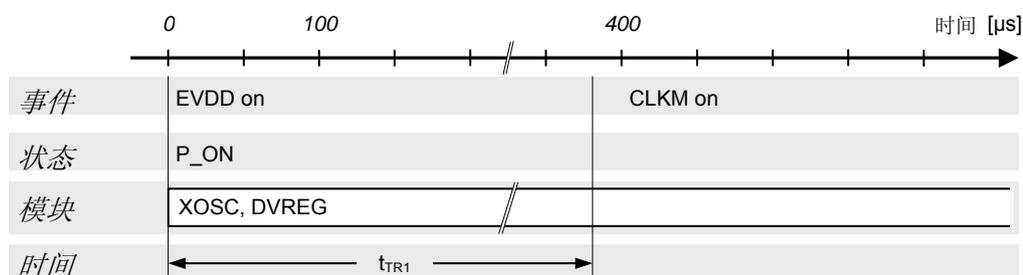
5.1.4 时序

下列各段介绍了状态转换机器时序属性。关于时序的介绍见于表 5-1 和 10.4 小节。

5.1.4.1 通电程序

P_ON 状态下的通电程序如图 5-3 所示。

图 5-3 P_ON 状态下的通电程序

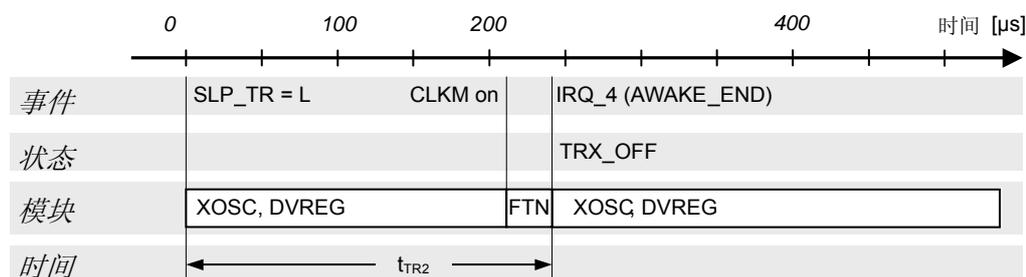


当 AT86RF212 接通外部电源电压 (EVDD) 时, 无线电收发器为数字域 (DVREG) 启动晶体振荡器 (XOSC) 和 1.8V 的内置电压调节器。在 t_{TR1} 之后, 引脚 17 (CLKM) 上出现主时钟信号, 默认频率为 1MHz。如果 CLKM 可用, 则 SPI 已启动且可用于控制收发器。

5.1.4.2 唤醒程序

从睡眠状态中唤醒的程序如图 5-4 所示。

图 5-4 睡眠模式唤醒程序



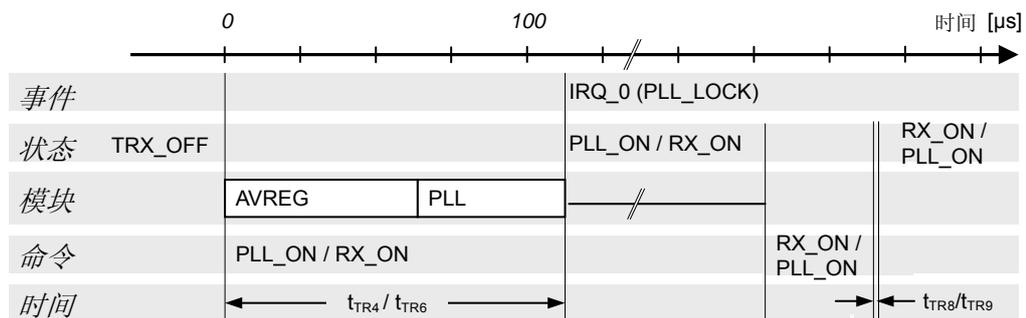
通过将引脚 SLP_TR 设为低逻辑值使无线电收发器推出睡眠状态, 重新启动 XOSC 和 DVREG。在 t_{TR2} 之后, 无线电收发器进入 TRX_OFF 状态。引脚 17 (CLKM) (如果启用) 上有可用内部时钟信号。

该程序与通电程序相似, 但无线电收发器会自动进入 TRX_OFF 状态。在滤波器调谐网络 (FTN) 中执行校准。IRQ_4(AWAKE_END)中断请求指示已进入 TRX_OFF 状态, 如果适当的屏蔽寄存器位启用该中断请求。

5.1.4.3 由 TRX_OFF 到 PLL_ON/RX_ON 的状态转换

由 TRX_OFF 到 PLL_ON/RX_ON 状态, 再到 RX_ON 或 PLL_ON 的状态转换见于图 5-5。

图 5-5 由 TRX_OFF 到 PLL_ON/RX_ON 状态, 再到 RX_ON 或 PLL_ON 的状态转换



附注: 如果在 TRX_OFF 的状态下 TRX_CMD=RX_ON, 即使 PLL 尚未建立也将立即进入 RX_ON 状态。

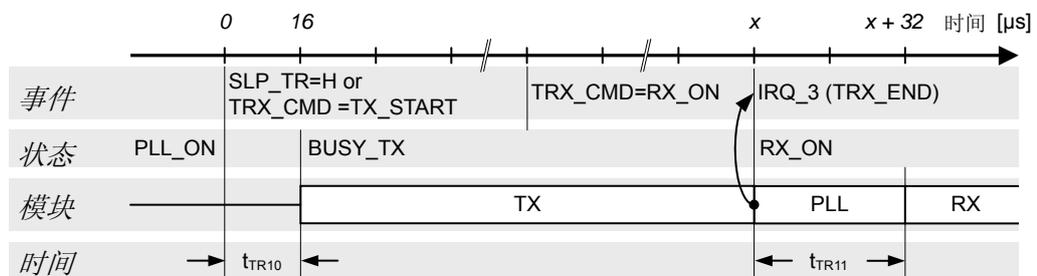
在 TRX_OFF 的状态下, 录入命令 PLL_ON 或 RX_ON 将开始数字域 (AVREG) 1.8V 的内置电压调节器的上斜坡时序。无论 PLL 是否已锁定, 均可随时从 PLL_ON 状态进入 RX_ON 状态, IRQ_0(PLL_LOCK)指示该状态转换。同样地, 可随时从 RX_ON 状态进入 PLL_ON 状态。

当已在 TRX_OFF 状态下设置 TRX_OFF_AVDD_EN(寄存器 0x0c, TRX_CTRL_2)时, 将立即启动数字电压调节器并进行转换为 PLL_ON 或 RX_ON 的上斜坡时序。

5.1.4.4 从经 BUSY_TX 从 PLL_ON 到 RX_ON 的状态转换

从 PLL_ON 到 BUSY_TX, 再到 RX_ON 状态的转换见于图 5-6。

图 5-6 O-QPSK 250 kbit/s 模式下从经 BUSY_TX 从 PLL_ON 到 RX_ON 的状态转换时序



假设 PLL 已被锁定, 在 PLL_ON 状态下, 可提供引脚 11 (SLP_TR) 的上升沿或命令 TX_START 开始发送。PLL 建立为发送频率, PA 被启用。

在 t_{TR10} 之后 (1 符号周期), AT86RF212 转入 BUSY_TX 状态, 发送内部生成的 SHR 和帧缓冲的 PSDU 数据。

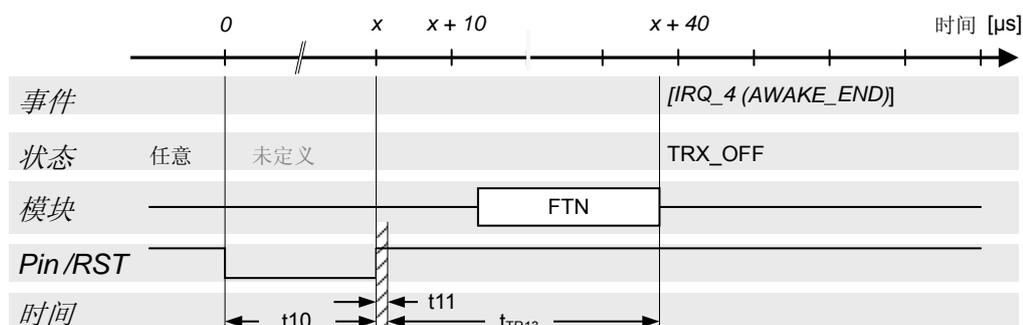
在完成帧发送之后, IRQ_3(TRX_END)中断请求指示其完成, PLL 在 t_{TR11} 内恢复为接收频率并返回 PLL_ON 状态。

如果在 BUSY_TX 状态下，要求无线电收发器转换至接收状态，则将在完成发送之后自动进入 RX_ON 状态，参看图 5-6。

5.1.4.5 复位程序

无线电收发器服务流程如图 5-7 所示。

图 5-7 复位程序



$\overline{RST}=L$ 将所有寄存器设为默认值，但寄存器位 CLKM_CTRL(寄存器 0x03, TRX_CTRL_0)除外，参看 7.7.4 小节。

在复位引脚 ($\overline{RST}=L$) 发出之后，执行带有 FTN 校准周期的唤醒时序，参看 7.9 小节。此后进入 TRX_OFF 状态。

图 5-7 显示了在离开 P_ON 状态之后，且无线电收发器不在睡眠状态时的复位程序。

除 P_ON 和睡眠状态以外的所有无线电收发器原状态复位程序都是相同的。但必须遵照 5.1.2.1 小节和 5.1.2.2 小节中所述的程序方可进入 TRX_OFF 状态。

如果无线电收发器处于睡眠状态，应在进入 TRX_OFF 状态之前启动 XOSC 和 DVREG。

附注：

- 如 10.4 小节所规定的，复位脉冲长度不得低于 t_{10} ，参看参数 10.4.13。
- 引脚 \overline{RST} 发出之后，不得在 t_{11} 过去之前对设备进行访问；参看 10.4 小节，10.4.14 参数。

5.1.4.6 状态转换时序概览

转换时序列于表 5-1 中，如无其他说明，则不包括 SPI 访问时间。参看图 3-1 中所示的测量设置。

表 5-1 状态转换时序

序号	符号	转换	标准时间	备注
1	t_{TR1}	P_ON \Rightarrow 直到 CLKM 可用	380 μ s	取决于晶体振荡器的设置 (CL=10pF) 及 DVDD 的外置电容(通常为 1 μ F)
2	t_{TR2}	睡眠状态 \Rightarrow TRX_OFF	710 μ s	取决于晶体振荡器的设置 (CL=10pF) 及 DVDD 的外置电容(通常为 1 μ F) 由 IRQ_4(AWAKE_END)指示 TRX_OFF 状态
3	t_{TR3}	TRX_OFF \Rightarrow 睡眠状态	35 轮 CLKM 周期	适用于 $f_{CLKM}>250kHz$
4	t_{TR4}	TRX_OFF \Rightarrow PLL_ON	110 μ s 20 μ s	如果未设置寄存器 TRX_OFF_AVDD_EN 位 (寄存器 0x0c,TRX_CTRL_2), 取决于 AVDD 的外置电容 (通常为 1 μ F)。 如果在某个状态下设置了寄存器 TRX_OFF_AVDD_EN 位, 则 PLL 被锁定为同一频率
5	t_{TR5}	PLL_ON \Rightarrow TRX_OFF	1 μ s	
6	t_{TR6}	TRX_OFF \Rightarrow RX_ON	110 μ s 20 μ s	如果未设置寄存器 TRX_OFF_AVDD_EN 位 (寄存器 0x0c,TRX_CTRL_2), 取决于 AVDD 的外置电容 (通常为 1 μ F)。 若寄存器 TRX_OFF_AVDD_EN 位被设为与 PLL 锁定为相同频率
7	t_{TR7}	RX_ON \Rightarrow TRX_OFF	1 μ s	
8	t_{TR8}	PLL_ON \Rightarrow RX_ON	1 μ s	
9	t_{TR9}	RX_ON \Rightarrow PLL_ON	1 μ s	转换时间对 TX_ARET_ON 和 RX_AACK_ON 也有效
10	t_{TR10}	PLL_ON \Rightarrow BUSY_TX	1 符号	当设定引脚 11 (SLP_TR) 或 TRX_CMD=TX_START 时, 第一个符号发送延时 1 个符号周期(PLL 建立和 PA 上斜坡), 参看 7.1.3 小节。
11	t_{TR11}	BUSY_TX \Rightarrow PLL_ON	32 μ s	PLL 建立时间
12	t_{TR12}	所有模式 \Rightarrow TRX_OFF	1 μ s	使用 TRX_CMD=FORCE_TRX_OFF(参看寄存器 0x02,TRX_STATE);在睡眠状态无效
13	t_{TR13}	复位状态 \Rightarrow TRX_OFF	26 μ s	在 P_ON 或睡眠状态无效
14	t_{TR14}	多种状态 \Rightarrow PLL_ON	1 μ s	使用 TRX_CMD=FORCE_PLL_ON(参看寄存器 0x02,TRX_STATE);在睡眠状态, P_ON, 复位状态, TRX_OFF 和*_NO_CLK 状态无效

依据图 5-3 至图 5-7 中所示的独立模块时序, 对状态转换时序进行计算。最差值包括最高运行温度, 最低电源电压和设备参数变化见于表 5-2。

表 5-2 模拟模块初始化与建立时间

符号	模块	时间[μ s], 标准值	时间[μ s], 最大值	备注
t_{TR15}	XOSC	215	1000	退出睡眠状态, 取决于晶体 Q 因数和载荷电容
t_{TR16}	FTN		25	滤波器调整时间
t_{TR17}	DVREG	60	1000	取决于 DVDD 的外置旁路电容 (CB3=1 μ F (正常值), 10 μ F (最差值)), 其 EVDD 电压
t_{TR18}	AVREG	60	1000	取决于 AVDD 的外置旁路电容 (CB1=1 μ F (正常值), 10 μ F (最差值)), 其 EVDD 电压

符号	模块	时间[μs], 标准值	时间[μs], 最大值	备注
t _{TR19}	PLL, 初始	96	276	PLL 建立时间 TRX_OFF = PLL_ON, 包括 60μs 的 AVREG 建立时间
t _{TR20}	PLL, 建立	11	42	频段内信道切换持续时间
t _{TR21}	PLL, CF 校准	8	270	PLL 中心频率校准, 参看第 7.8.4 小节
t _{TR22}	PLL,DCU 校准	10		PLL DCU 校准, 参看第 7.8.4 小节
t _{TR23}	PLL,RX ⇌ TX	16		PLL 建立时间 RX⇌TX
t _{TR24}	PLL,TX ⇌ RX	32		PLL 建立时间 TX⇌RX
t _{TR25}	RSSI	BPSK-20:32 BPSK-40:24 O-QPSK:8		RSSI 接收状态更新期, 参看第 6.4.2 小节
t _{TR26}	ED	8 个符号		ED 测量期, 参看第 6.5 小节 高数据传输速率模式不同时序, 参看第 6.5.5 及 7.1.4.3 小节
t _{TR28}	CCA	8 个符号		CCA 测量期, 参看第 6.6.2 小节
t _{TR29}	随机值	1		随机值更新期, 参看第 9.2.1 小节

5.1.5 寄存器介绍

寄存器 0x01(TRX_STATUS):

对 TRX_STATUS 寄存器的读取访问可发出当前无线电收发器状态信号。要改变状态, 应先在寄存器 TRX_CMD 位 (寄存器 0x02, TRX_STATE) 写入状态转换命令。或者, 也可以在适当的状态下由引脚 11 (SLP_TR) 的上升沿开始状态转换。

此寄存器用于基本操作模式与扩展操作模式, 参看 5.2 小节。

表 5-3 寄存器 0x01(TRX_STATUS)

位	7	6	5	4
名称	CCA_DONE	CCA_STATUS	预留	TRX_STATUS
读取/写入	R	R	R	R
复位值	0	0	0	0

位	3	2	1	0
名称	TRX_STATUS	TRX_STATUS	TRX_STATUS	TRX_STATUS
读取/写入	R	R	R	R
复位值	0	0	0	0

• **第 7 位-CCA_DONE**

参看 6.6 小节

• **第 6 位-CCA_STATUS**

参看 6.6 小节

• **第 5 位-预留**

• **4: 0 位-TRX_STATUS**

寄存器 TRX_STATUS 位发出当前无线电收发器状态信号。如果尚未完成要求的状态转换, TRX_STATUS 返回 STATE_TRANSITION_IN_PROGRESS (状态转换处理中)。请勿试图在无线电收发器处于 STATE_TRANSITION_IN_PROGRESS (状态转换处理中) 的情况下开始另一个状态转换。状态转换时序定义见于表 5-1。

表 5-4 无线电收发器状态，寄存器 TRX_STATUS 位

寄存器位	值	状态说明
TRX_STATUS	0x00	P_ON
	0x01	BUSY_RX
	0x02	BUSY_TX
	0x06	RX_ON
	0x08	TRX_OFF(CLK 模式)
	0x09	PLL_ON (TX_ON)
	0x0F ⁽³⁾	睡眠
	0x11 ⁽¹⁾	BUSY_RX_AACK
	0x12 ⁽¹⁾	BUSY_TX_ARET
	0x16 ⁽¹⁾	RX_AACK_ON
	0x19 ⁽¹⁾	TX_ARET_ON
	0x1C	RX_ON_NOCLK
	0x1D ⁽¹⁾	RX_AACK_ON_NOCLK
	0x1E ⁽¹⁾	BUSY_RX_AACK_NOCLK
	0x1F ⁽²⁾	STATE_TRANSITION_IN_PROGRESS
		所有其他值均为预留值

附注：1. 仅限扩展操作模式，参看 5.2 小节。

2. 请勿试图在无线电收发器处于 STATE_TRANSITION_IN_PROGRESS（状态转换处理中）的情况下开始另一个状态转换。

3. 在睡眠状态下不可访问寄存器。

寄存器 0x02 (TRX_STATE):

可通过写入寄存器 TRX_CMD 位开始无线电收发器状态转换。此寄存器用于基本操作模式和扩展操作模式，参看 5.2 小节。

表 5-5 寄存器 0x02 (TRX_STATE)

位	7	6	5	4
名称	TRAC_STATUS	TRAC_STATUS	TRAC_STATUS	TRX_CMD
读取/写入	R	R	R	R/W
复位值	0	0	0	0

位	3	2	1	0
名称	TRX_CMD	TRX_CMD	TRX_CMD	TRX_CMD
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0

• 7: 5 位-TRAC_STATUS

参看 5.2.6 小节。

• 4: 0 位-TRX_CMD

对寄存器 TRX_CMD 位的写入访问将开始无线电收发器的状态转换。

表 5-6 状态控制命令，寄存器 TRX_CMD 位

寄存器位	值	状态转换至	
TRX_CMD	0x00	NOP	
	0x02	TX_START	
	0x03	FORCE_TRX_OFF	
	0x04 ⁽¹⁾	FORCE_PLL_ON	
	0x06	RX_ON	
	0x08	TRX_OFF(CLK 模式)	
	0x09	PLL_ON(TX_ON)	
	0x16 ⁽²⁾	RX_AACK_ON	
	0x19 ⁽²⁾	TX_ARET_ON	
		所有其他值均为预留值，设计为 NOP。	

附注：1.FORCE_PLL_ON 在睡眠状态，复位状态和所有的*_NOCLK 状态，以及由 STATE_TRANSITION_IN_PROGRESS（状态转换处理中）转换为上述状态时无效。

2.仅限于扩展操作模式，参看 5.2.6 小节。

5.2 扩展操作模式

扩展操作模式是一个硬件 MAC 加速器，而且其功能超越了基本操作模式提供的无线电收发器基本功能。它负责处理 IEEE802.15.4-2003/2006 要求的 MAC 时序攸关任务，如自动应答、自动 CSMA-CA 和重传，从而实现了更有效的 IEEE802.15.4-2003/2006 软件 MAC 执行，包括代码缩减及可使用更小的微控制器。

扩展运行模式设计用于支持 IEEE 802.15.4-2003/2006 的标准合规帧并由以下步骤组成：

自动应答 (RX_AACK 处理) 分为下列任务：

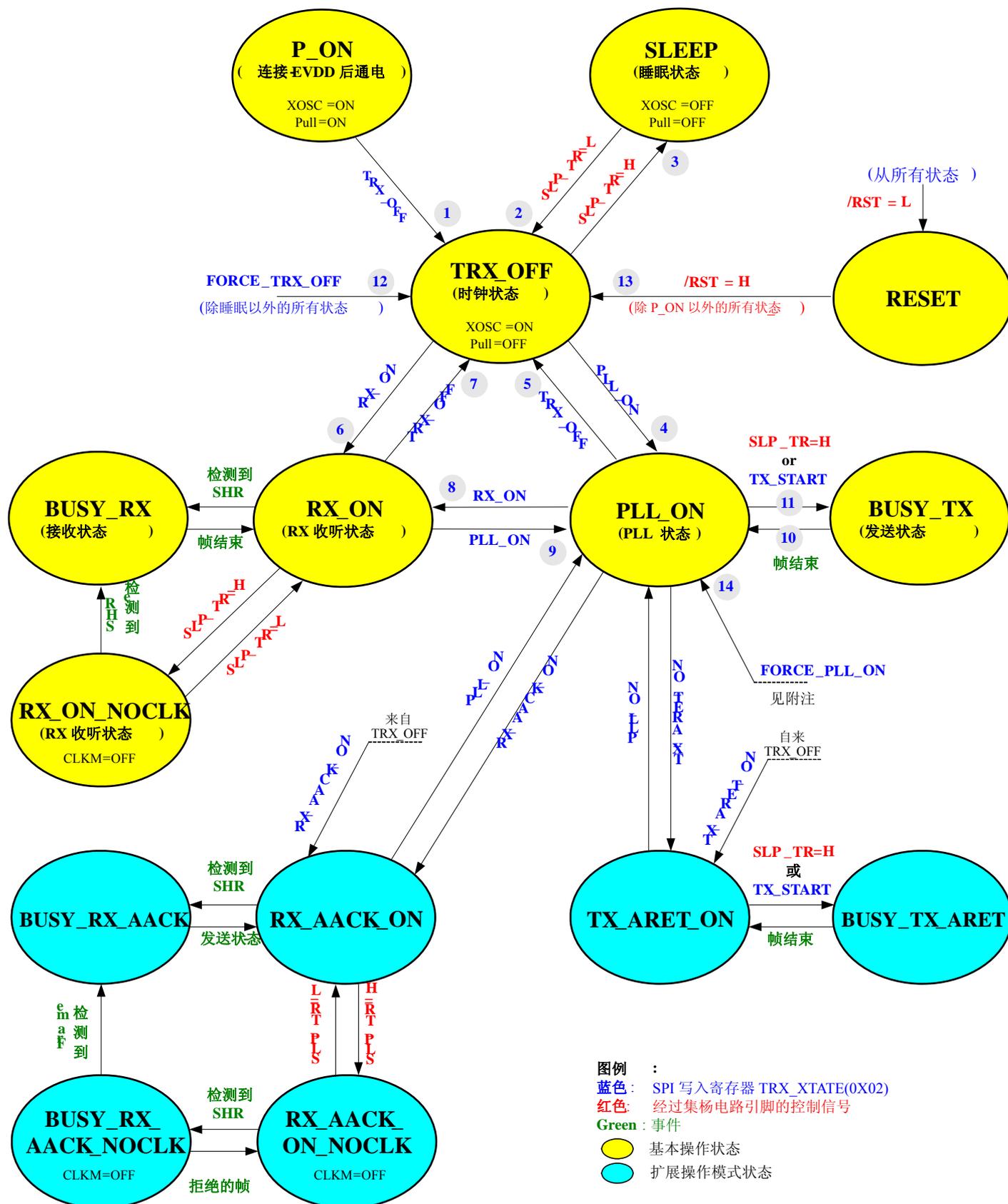
- 帧接收与自动 FCS 校验
- 可设置寻址字段校验
- 中断指示地址匹配
- 中断指示帧接收（若通过帧过滤处理与 FCS 校验）
- 自动应答 (ACK) 帧发送（如可用）
- 通过 SLP_TR 引脚支持开槽应答（用于信标使能操作）

自动 CSMA-CA 和重传(TX_ARET 处理)分为下列任务：

- CSMA-CA 包括自动 CCA 和随机避退
- 帧发送及自动 FCS 字段生成
- ACK 帧接收（如要求 ACK）
- 自动重试发送，如要求 ACK 但未接收或收到
- 含转换状态的中断信号发出

AT86RF212 状态原理图包括图 5-8 中所示的扩展操作模式状态。黄色标示的状态代码基本操作模式；蓝色标示状态代码扩展操作模式。

图 5-8 扩展操作模式状态原理图



5.2.1 状态控制

扩展操作模式 RX_AACK 及 TX_aret 由寄存器 TRX_CMD 位控制(寄存器 0x02,TRX_STATE), 可接收状态转换命令。如图 5-8 所示可分别由 TRX_OFF 或 PLL_ON 状态转换至相应状态 RX_AACK_ON 和 TX_aret_ON。读取寄存器 0x01 (TRX_STATUS) 对成功的状态转换进行确认。

RX_AACK-接收及自动 ACK

通过在寄存器 TRX_CMD 位(寄存器 0x02,TRX_STATE)写入 RX_AACK_ON 命令开始从 PLL_ON 或 TRX_OFF 状态转换至 RX_AACK_ON 状态。在成功读取寄存器 0x01 (TRX_STATUS) 返回 RX_AACK_ON 或 BUSY_RX_AACK。如果目前正准备接收帧, 将返回后者。

由在寄存器 TRX_CMD 位写入 PLL_ON 命令结束 RX_AACK 扩展操作模式。若 AT86RF212 处于帧接收或应答程序 (BUSY_RX_AACK) 中, 则在完成之后执行主题转换。或者, 可使用 FORCE_TRX_OFF 或 FORCE_PLL_ON 取消 RX_AACK 处理并分别转换为收发器状态 TRX_OFF 或 PLL_ON。

TX_aret—发送及自动重传及 CSMA-CA 重试

相似的, 通过在寄存器 TRX_CMD 位 (寄存器 0x02, TRX_STATUS) 写入 TX_aret_ON 命令开始由 PLL_ON 或 TRX_OFF 状态转换至 TX_aret_ON 状态。当寄存器 0x01 (TRX_STATUS) 返回 TX_aret_ON, 无线电收发器处于 TX_aret_ON。实际上, 是通过引脚 11 (SLP_TR) 上升沿或在寄存器 TRX_CMD 位写入 TX_START 命令开始 TX_aret 处理。

通过在寄存器 TRX_CMD 位写入 PLL_ON 命令结束 TX_aret 扩展操作模式。如果 AT86RF212 处于 CSMA-CA 中, 则在结束之后执行帧发送或应答程序 (BUSY_TX_aret) 的状态转换。或者, 可使用 FORCE_PLL_ON 命令立即结束 TX_aret 处理并转换至收发器 PLL_ON 状态。

附注

- 从 TRX_OFF 状态转换至 RX_AACK_ON 或 TX_aret_ON 的要求在单片机内部由 PLL_ON 转换至开启无线电收发器前端。因此, 接收或发送数据的准备相应延后 (见表 5-1)。在此情况下, 建议使用中断请求 IRQ_0(PLL_LOCK)作为指示符。

5.2.2 配置

由于扩展操作模式的应用是基于基本操作模式功能的, 因此在以下章节中仅介绍基本无线电收发器功能。欲了解基本操作模式的详细信息, 请参考 5.1 小节。

当使用 RX_AACK 或 TX_aret 模式的时候, 需要配置下列寄存器。

RX_AACK 配置步骤:

- 设置帧滤波器: 寄存器 0x02-0x2B

- 短地址, PAN ID 和 IEEE 地址
- 应答生成配置 寄存器 0x2C,0x2E
 - 帧版本子字段处理
 - 未完成数据处理
 - 自动或开槽 ACK 生成
- 附加帧滤波属性 寄存器 0x17
 - 帧滤波器版本控制
 - 将设备特性设为 PAN 网络协调器, 如果需要
 - 混杂模式
 - 预留帧类型处理

帧滤波器配置如 6.2.1 小节所述。地址匹配算法的地址存储在适当的地址寄存器。其他 RX_AACK 模式控制由寄存器 0x17(XAH_CTRL_1)和寄存器 0x2E(CSMA_SEED_1)。

不同设备操作模式和不同帧类型处理的配置示例见于 5.2.3.1 小节。

TX_ARET 配置步骤:

- 必要时, 激活自动 FCS 处理 寄存器 0x04
- CSMA-CA 配置
 - MAX_FRAME_RETRIES 寄存器 0x2C
 - MAX_CSMA_RETRIES 寄存器 0x2C
 - CSMA_SEED 寄存器 0x2D,0x2E
 - MAX_BE,MIN_BE 寄存器 0x2F
- CCA 配置 (参看 6.6 小节)

MAX_FRAME_RETRIES(寄存器 0x2C, XAH_CTRL_0)定义帧重传的最大数。

寄存器 MAX_CSMA_RETRIES 位 (寄存器 0x2C) 设置在检测到信道被占用之后设置 CSMA-CA 的最大数。

寄存器 CSMA_SEED_0 和 CSMA_SEED_1 位 (寄存器 0x2D,0x2E) 定义 AT86RF212 的避退时间随机数发生器的随机数种子。

寄存器 MAX_BE 和 MIN_BE 位 (寄存器 0x2F) 分别定义 CSMA 避退指数的最大值和最小值。

5.2.3 RX_AACK_ON—接收及自动 ACK

RX_AACK 扩展操作模式处理 IEEE802.15.4 合规帧的接收与自动应答。

RX_AACK 算法的一般流见于图 5-9。图中灰色阴影部分为 IEEE802.15.4 合规帧的 RX_AACK 处理标准流, 参看 5.2.3.2 小节。所有其他程序均为特别操作模式或帧结构例外情况, 请参考 5.2.3.3 小节。

在 RX_AACK_ON 状态中, AT86RF212 收听输入帧。在检测非零 PHR 时, AT86RF212 转换为 BUSY_RX_AACK 状态并对 MAC 头 (MHR) 的帧内容进行解析, 参看 6.1.2 小节。

如果收到帧的 MAC 寻址自动内容（参考 IEEE802.15.4 帧结构，见 7.2.1 小节）经过帧滤波器，则发出地址匹配中断请求 IRQ_5(AMI)。参考地址值将存储在寄存器 0x20-0x2B（短地址，PAN ID 和 IEEE 地址）。帧滤波器操作详细介绍见于 6.2 小节。

通常，在节点设置为普通设备或 PAN 网络协调器，如果帧经过帧滤波器且 FCS 有效，那么中断请求 IRQ_3(TRX_END)将指示帧。在完成帧接收之后，发出中断请求。然后，微控制器可读取帧数据。如果启用混杂模式，将应用例外情况；参看 5.2.3.2 小节。在此情况下，对所有帧发出中断请求 IRQ_3。

在接收过程中，AT86RF212 解析接收数据或 MAC 命令帧的帧控制字段第 5 位（ACK 要求）以便校验是否要求应答（ACK）回应。在此情况下，如果帧符合三级滤波规则（见 IEEE802.15.4-2006，参看 7.5.6.2 小节），那么无线电发送器自动生成并发送 ACK 帧并返回 RX_AACK_ON 状态。

默认设定为，在接收数据或 MAC 命令帧的最后一个符号之后，在一个周转周期后（12 个符号，见 IEEE 802.15.4，参看 6.4.1 小节）发送应答帧。或者，在非合规网络中，寄存器 AACK_ACK_TIME 位（寄存器 0x2E, XAH_CTRL_1）可将此延时缩短至 2 个符号。

ACK 应答帧未完成子字段的内容依寄存器 AACK_SET_PD 位设置（寄存器 0x2E, CSMA_SEED_1）。从相应地接收帧复制序列数。

如果设置了寄存器 AACK_DIS_ACK 位（寄存器 0x2E, CSMA_SEED_1），即使要求也不会发送应答帧。

在卡槽操作中，由引脚 11（SLP_TR）控制应答帧发送的开始，参考 5.2.3.5 小节。

RX_AACK 处理状态由寄存器子字段 TRAC_STATUS（寄存器 0x02, TRX_STATE）指示。表 5-7 列出了相应值。

表 5-7 TRAC_STATUS 寄存器位的 RX_AACK 中断请求

值	名称	说明
0	成功	成功完成处理
2	等待应答成功	处理等待一个周转周期符号直至发送应答或要求引脚 11（SLP_TR）上升沿开始发送（卡槽操作）
7	无效	当请求 RX_AACK 处理时，为默认值

请注意通常 AT86RF212 的 PHY 模式及扩展特性设置独立于 RX_AACK 扩展操作模式工作。

5.2.3.1 寄存器配置

概述

如下文所述,应在将 AT86RF212 切换至 RX_AACK_ON 之前进行 RX_AACK 配置,参看 5.2.1。

表 5-8 综述了所有影响 RX_AACK 处理功能的寄存器位。要进行帧过滤处理,则还须设置地址寄存器以便匹配要求的地址。

表 5-8 RX_AACK 配置位概述

寄存器地址	寄存器位	寄存器名称	说明
0x20,0x21 0x22,0x23 0x24 ... 0x2B		SHORT_ADDR_0/1 PAN_ADDR_0/1 IEEE_ADDR_0 ... IEEE_ADDR_7	设置帧滤波器,参看 6.2.1
0x0C	7	RX_SAFE_MODE	动态帧缓冲保护,参看 9.7 小节
0x17	1	AACK_PROM_MODE	激活混杂模式
0x17	2	AACK_ACK_TIME	修改自动应答开始时间
0x17	4	AACK_UPLD_RES_FT	激活预留帧类型接收,须接收非标准合规帧,参看 5.2.3.3
0x17	5	AACK_FLTR_RES_FT	滤波器预留帧类型和数据帧类型相同,须进行非标准合规帧滤波,参看 5.2.3.3
0x2C	0	SLOTTED_OPERATION	如果设置,则须由引脚 11 (SLP_TR) 触发应答发出,参看 4.6 小节
0x2E	3	AACK_I_AM_COORD	将设备定义为 PAN 网络协调器,参看 5.2.3.2
0x2E	4	AACK_DIS_ACK	禁用应答生成
0x2E	5	AACK_SET_PD	应答帧控制字段 (FCF) 中的未完成数据信号发出
0x2E	7:6	AACK_FVN_MODE	控制 ACK 生成,由 FCF 帧版本号决定

不同设备类型或操作模式的 RX_AACK 配置位使用介绍见于以下各章节。在以下两节未提及的配置位应按照表 12-2 设置为其复位值。

表 5-8 中所述的所有寄存器介绍见于 5.2.6 小节。

5.2.3.2 IEEE 合规场景配置

设备未作为 PAN 网络协调器操作

表 5-9 列出了典型 IEEE 802.15.4 合规设备设置要求的 RX_AACK 寄存器配置。

表 5-9 IEEE 802.15.4 设备配置

寄存器地址	寄存器位	寄存器名称	说明
0x20,0x21 0x22,0x23 0x24 ... 0x2B		SHORT_ADDR_0/1 PAN_ADDR_0/1 IEEE_ADDR_0 ... IEEE_ADDR_7	设置帧滤波器，参看 6.2.1 小节
0x0C	7	RX_SAFE_MODE	0: 禁用帧保护 1: 启用帧保护
0x2C	0	SLOTTED_OPERATION	0: 收发器在非卡槽模式中操作 1: 收发器在卡槽模式中操作，操作 5.2.3.5 小节
0x2E	7:6	AACK_FVN_MODE	依照 FCF 帧版本数控制 ACK 操作 b00: 只对版本号带 0 的帧进行应答，即符合 IEEE 802.15.4-2003 帧 b01: 只对版本号带 0 或 1 的帧进行应答，即符合 IEEE 802.15.4-2003/2006 b10: 只对版本号带 0 或 1 或 2 的帧进行应答 b11: 应答所有帧，无论 FCF 帧版本号是什么

附注

- 短地址默认值为 0xFFFF。因此，如果段地址已设置，则帧滤波器只接收带有广播地址或 IEEE 地址的帧。
- 在 IEEE802.15.4-2003 标准中，帧版本子字段仍不存在，但标记为预留。依此标准，预留字段必须设置为零。同时，IEEE802.15.4-2003 标准要求接收后忽视已接收位。因此，标准中存在矛盾，可通过两种方式中断：
 - 如果按照 IEEE802.15.4-2003 的规定，网络只允许访问节点，那么 AACK_FVN_MODE 应设置为 0。
 - 如果设备应不计帧版本，应答所有帧，那么 AACK_FVN_MODE 应设置为 3。但是，这回导致与并存的 IEEE 802.15.4-2006 标准的合规网络冲突。

PAN 网络协调器的情况相同，详见下文。

PAN 网络协调器

表 5-10 列出了设置 PAN 网络协调器设备所需的 RX_AACK 寄存器配置。

表 5-10 PAN 网络协调器配置

寄存器地址	寄存器位	寄存器名称	说明
0x20,0x21 0x22,0x23 0x24 ... 0x2B		SHORT_ADDR_0/1 PAN_ADDR_0/1 IEEE_ADDR_0 ... IEEE_ADDR_7	设置帧滤波器，参看 6.2.1 小节
0x0C	7	RX_SAFE_MODE	0: 禁用帧保护 1: 启用帧保护
0x2C	0	SLOTTED_OPERATION	0: 收发器在非开槽模式中操作 1: 收发器在开槽模式中操作，操作 5.2.3.5 小节
0x2E	3	AACK_I_AM_COORD	1: 设备为 PAN 网络协调器
0x2E	5	AACK_SET_PD	0: 帧未完成子字段为 FCF 中的 0 1: 帧未完成子字段为 FCF 中的 1
0x2E	7:6	AACK_FVN_MODE	依照 FCF 帧版本数控制 ACK 操作 b00: 只对版本号带 0 的帧进行应答，即符合 IEEE 802.15.4-2003 帧 b01: 只对版本号带 0 或 1 的帧进行应答，即符合 IEEE 802.15.4-2003/2006 b10: 只对版本号带 0 或 1 或 2 的帧进行应答 b11: 应答所有帧，无论 FCF 帧版本号是什么

混杂模式或嗅探器

混杂模式介绍见于 IEEE802.15.4-2006，第 7.5.6.5 小节。在图 5-9 中，也列出了此模式。按照混杂模式中的 IEEE 802.15.4-2006,MAC 子层将经过带有正确的 FCS 的接收帧达到下一个更高级层，且未经处理。这表示接收帧不应自动应答。

为了支持嗅探器和混杂模式的应用，只将 IEEE802.15.4-2006，第 7.5.6.2 小节定义的第二级滤波器规则应用于接收帧。

表 5-11 列出了在混杂模式中操作的设置典型 IEEE802.15.4 合规设备所需的 RX_AACK 寄存器配置。

表 5-11 混杂模式的配置

寄存器地址	寄存器位	寄存器名称	说明
0x20,0x21 0x22,0x23 0x24 ... 0x2B		SHORT_ADDR_0/1 PAN_ADDR_0/1 IEEE_ADDR_0 ... IEEE_ADDR_7	各个地址均被设置为： 0x00
0x17	1	AACK_PROM_MODE	1: 激活混杂模式
0x2E	4	AACK_DIS_ACK	1: 禁用应答生成

为了发出数据帧可用性信号，即使 FCS 不可用，也会发出 IRQ_3(TRX_END)。因此，必须在 IRQ_3(TRX_END)之后读取寄存器 RX_CRC_VALID 位（寄存器 0x06,PHY_RSSI）以便验证带有有效 FCS 帧的接收。另外，可对 RX_STATUS 的第 7 字节位进行评估，参看第 4.3.2 小节。

如果在混杂模式中操作的设备接收到带有通过三级滤波的有效 FCS 帧（依 IEEE802.15.4-2006,第 7.5.6.2 小节），将发送应答（ACK）帧。但是，按照混杂模式的定义，即使请求应答，也不能应答接收到的帧。因此，寄存器 AACK_DIS_ACK 位（寄存器 0x2E, CSMA_SEED_1）必须设置为 1，以便禁用 ACK 生成。

在所有接收模式中，按照 6.2 小节中所示的滤波器规则，如果接收帧匹配节点地址，发出中断请求 IRQ_5(AMI)。

也可使用 RX_ON 状态（基本操作模式）执行混杂模式，参看 5.1 小节。但是，RX_AACK 处理也会启用自动应答和非破坏性帧过滤处理等扩展功能。

5.2.3.3 非 IEEE 合规场景配置

预留帧类型

在 RX_AACK 模式中，也可处理带有预留帧类型的帧，参看 6.1.2.2 小节，表 6-2。当执行所有权非标准合规协议时，可能有此要求。预留帧类型接收为 AT86RF212 帧滤波器的一项扩展功能，参看 6.2 小节。可将预留帧作为数据帧处理，或允许完全由帧滤波器旁路处理。图 5-9 中的流程图列出了相应的单品机状态。

除了表 5-9 或表 5-10，下表 5-12 列出了接收预留帧类型节点设置所需的 RX_AACK 寄存器配置。

表 5-12 接收预留帧类型的 RX_AACK 配置

寄存器地址	寄存器位	寄存器名称	说明
0x17	4	AACK_UPLD_RES_FT	1: 启用预留帧类型接收
0x17	5	AACK_FLTR_RES_FT	滤波器预留帧类型与数据帧类型相同，参看以下附注 0: 禁用 1: 启用

可选择两张不同的方式以处理预留帧类型：

1. `AACK_UPLD_RES_FT=1,AACK_FLTR_RES_FT=0`
中断请求 `IRQ_3(TRX_END)`将指示含有预留帧类型的任何未破坏帧。不对这些帧应用其他帧过滤处理。一直不生成中断请求 `IRQ_5(AMI)`，且不发送应答。
2. `AACK_UPLD_RES_FT=1,AACK_FLTR_RES_FT=1`
将任何带有预留帧类型的帧作为 IEEE802.15.4 合规数据帧处理。这意味着在地址匹配之后，生成中断请求 `IRQ_5(AMI)`。如果地址匹配且帧正确（FCS 有效），则只会生成中断请求 `IRQ_3(TRX_END)`。那么，如果接收帧的应答（ACK）请求子字段做出相应设置，则发送应答。

短应答帧（ACK）开始时序

寄存器 `AACK_ACK_TIME` 位（寄存器 `0x17`，`XAH_CTRL_1`），参看表 5-13，定义了帧接收结束与应答帧发送开始之间的延时。

表 5-13 非卡槽操作的 ACK 开始时序

寄存器地址	寄存器位	寄存器名称	说明
0x17	2	AACK_ACK_TIME	0: 12 符号周期的标准合规应答延时 1: 2 符号周期（BPSK-20,O-QPSK- $\{100,200,400\}$ ）或 3 符号周期的（BPSK-40,O-QPSK- $\{250,500,1000\}$ ）缩短应答延时。

请注意无论其他配置如何，均可在各个场景中使用此功能。但是，当使用高数据传输速率时，特别使用较短的应答时序以便提高电池的使用寿命并提高总数据吞吐量；参看 7.1.4.3 小节。

在卡槽操作模式中，实际上是通过引脚 11（`SLP_TR`）开始应答发送。表 5-14 列出了 AT86RF212 可使用的带有适当延时的触发引脚。因此不能提早开始发送。

表 5-14. ACK 卡槽操作开始时序

寄存器地址	寄存器位	寄存器名称	说明
0x17	2	AACK_ACK_TIME	0: 在 6 个符号周期之后，可触发应答帧发送 1: 在 3 个符号周期之后，可触发应答帧发送

5.2.3.4 `RX_AACK_NOCLK`—`RX_AACK_ON` 无 `CLKM`

如果 AT86RF212 正在收听一个输入帧且微控制器并无运行应用，则可使微控制器掉电以便减少总系统功耗。AT86RF212 通过 `RX_AACK_NOCLK` 和 `BUSY_RX_AACK_NOCLK` 状态支持在时钟同步模式中（参看 4.2 小节）运行这种特殊的系统掉电模式，参看图 5-8。上述功能实现了与引脚 17（`CLKM`）禁用的 `RX_AACK_ON` 和 `BUSY_RX_AACK` 状态相同的功能。

通过引脚 11 (SLP_TR) 的上升沿, 由 RX_AACK_ON 状态进入 RX_AACK_NOCLK 状态。中断请求 IRQ_3 (TRX_END) 指示的有效帧接收, 或引脚 SLP_TR 的下降沿均会导致自动返回 RX_AACK_ON 状态。

如果接收帧通过帧过滤处理且带有正确的 FCS, 则该接收帧被视为有效。如果请求 ACK, 无线电收发器将进入 BUSY_RX_AACK 状态并继续 5.2.3 小节中所述的程序。

在 RX_AACK 处理完成之后, 无线电收发器仍处于 RX_AACK_ON 状态中。AT86RF212 只有在引脚 11 (SLP_TR) 的下一个上升沿才会再次进入 RX_AACK_NOCLK 状态。

在 CLKM 禁用/启用的情况下的时序和性能如 4.6 小节所述。

请注意 RX_AACK_NOCLK 不适用于卡槽操作模式 (参看 5.2.3.5)。

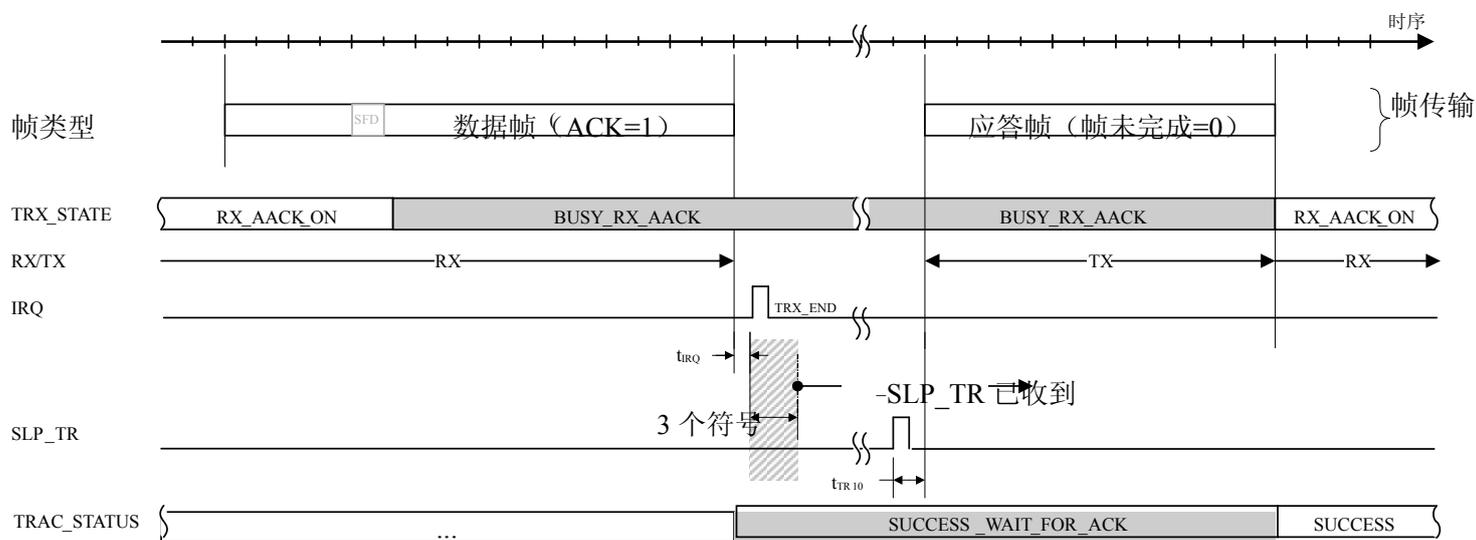
5.2.3.5 卡槽操作-开槽应答

在使用卡槽操作的网络中, 应答帧的开始及其确切时序, 必须由微控制器提供。信标网络中的应答发送确切时序要求介绍见于 IEEE802.15.4-2006, 第 7.5.6.4.2 小节。AT86RF212 与微控制器配合使用可支持开槽应答操作。通过将寄存器 SLOTTED_OPERATION 位 (寄存器 0x2C, XAH_CTRL_0) 设置为 1, 启用此模式。

如果在 RX_AACK 模式中发送应答 (ACK) 帧, 无线电收发器要求在引脚 11 (SLP_TR) 的上升沿实际开始发送。在此等待期间, 收发器提供寄存器 TRAC_STATUS 位 (寄存器 0x02, XAH_CTRL_0) 报告 SUCCESS_WAIT_FOR_ACK (应答等待成功), 参看图 5-9。在卡槽操作中, 中断请求 IRQ_3 (TRX_END) 的发出和应答帧引脚的启动之间的最小延时为 3 个符号期间。

图 5-10 列出了卡槽操作中的 RX_AACK 处理时序。应答帧在接收了最后一个数据符号或 MAC 命令帧 (由中断请求 IRQ_3 指示) 3 个符号周期之后准备好进行发送。由微控制器通过引脚 11 (SLP_TR) 的上升沿开始应答帧发送, 然后开始 t_{TR10} 。

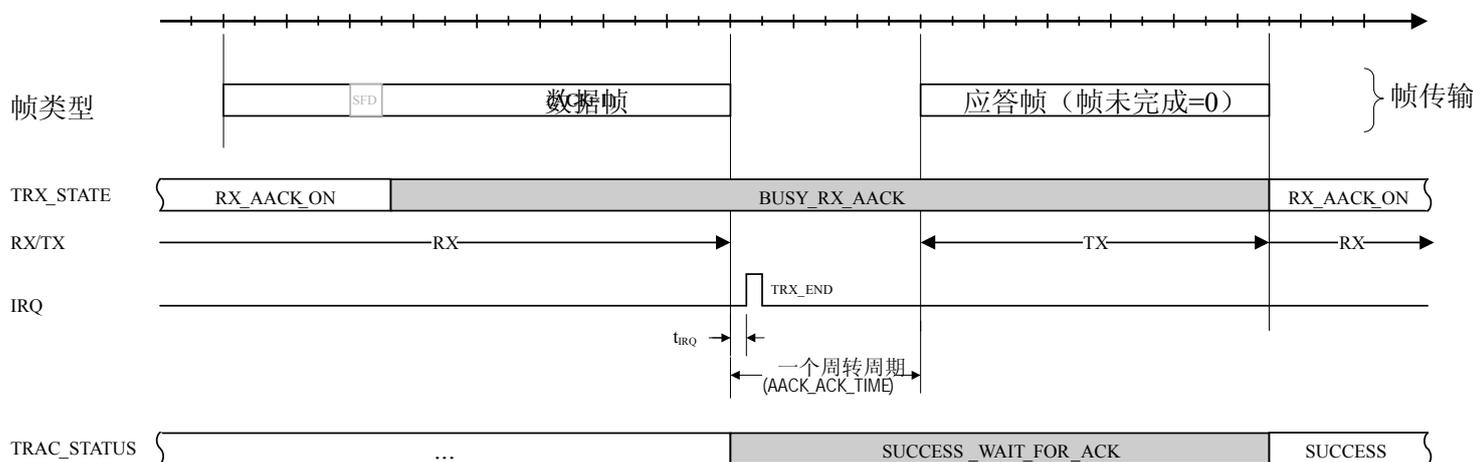
图 5-10 卡槽操作的 RX_AACK 处理时序示例



5.2.3.6 时序

RX_AACK 处理的一般时序示例如图 5-11 所示。在此示例中，接收的是带应答请求的数据帧。AT86RF212 在 SFD 检测之后转换为 BUSY_RX_AACK 状态。TRX_END 中断请求指示帧接收完成。此例禁用 IRQ_2(TX_START) 和 IRQ_5 (AMI) 中断请求。在默认应答帧开始时序下，在一个周转周期 (12 个符号) 之后自动发送应答帧。中断延期 t_9 的规定见于 10.4 小节。

图 5-11 RX_AACK 处理时序示例



5.2.4 TX_ARET_ON 一带自动重传及 CSMA-CA 重试的发送

TX_ARET 控制操作模式支持 IEEE802.15.4-2006 所规定的帧发送处理。如 5.2.1 小节所述，通过在寄存器子字段 TRX_CMD (寄存器 0x02, TRX_STATE) 写入 TX_ARET_ON 开始此处理。

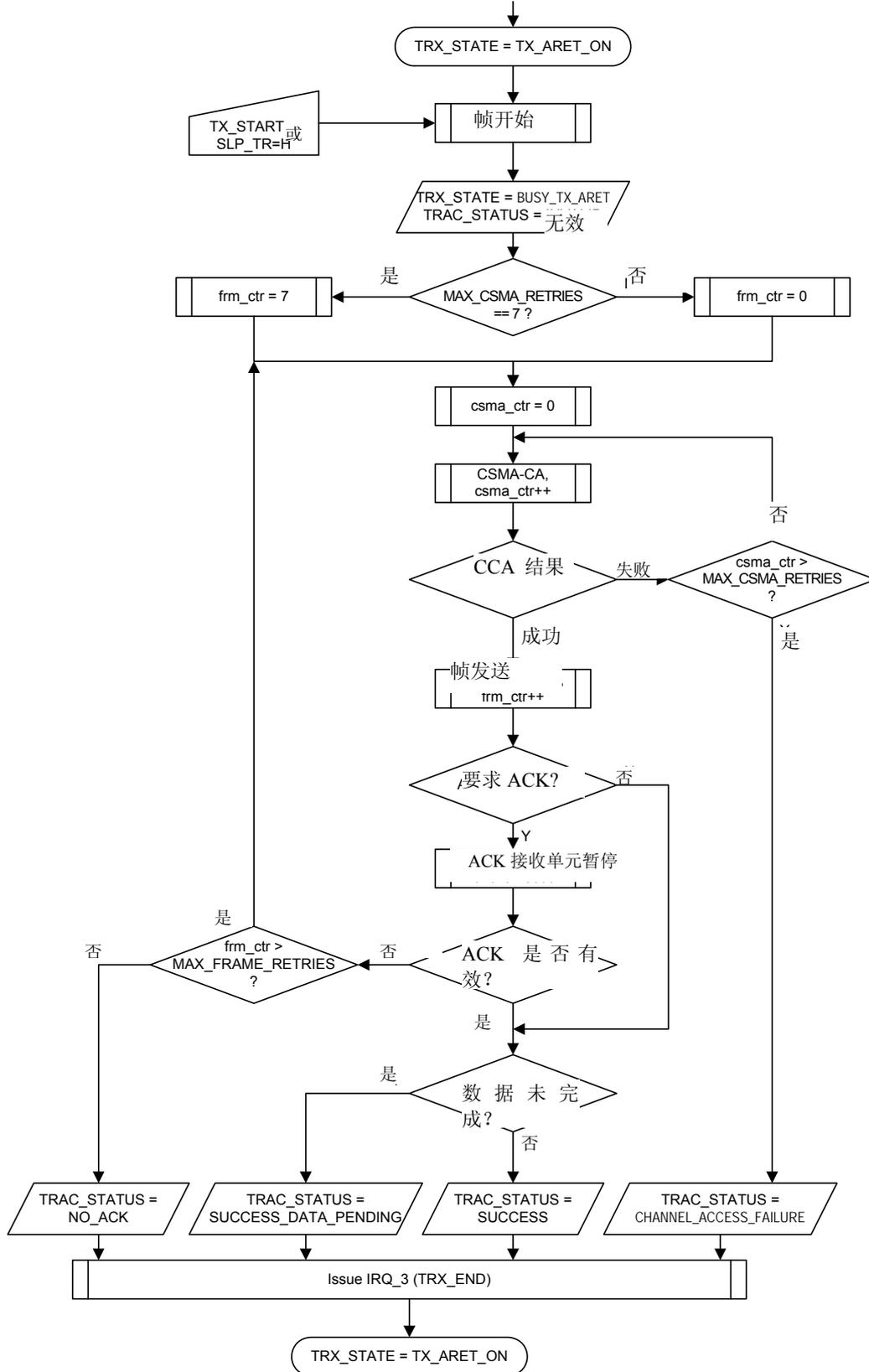
如果在 TX_ARET 模式中开始发送，那么如 IEEE802.15.4-2006,第 7.5.1.4 小节所定义的，AT86RF212 将执行 CSMA-CA 算法。如果 CCA 报告 IDLE，则由帧缓冲发送帧，



如果请求应答帧，那么无线电收发器将自动校验应答回复。只要未收到有效应答或已超过帧重传数量（MAX_FRAME_RETRIES）则重复基于 CSMA-CA 的发送处理。

中断请求 IRQ_3（TRX_END）指出 TX_ARET 处理的完成，参看 5.2.5 小节。

图 5-12 TX_ARET 流程图



说明

执行的 TX_ARET 算法如图 5-12 所示。

在启用 TX_ARET 模式之前（参看 5.2.1 小节），应执行 5.2.2 中所述的基本配置步骤。此外，建议先在帧缓冲中写入 PSDU 发送数据。

可通过引脚 11（SLP_TR）上升沿或在寄存器子字段 TRX_CMD（寄存器 0x02,TRX_STATE）写入 TX_START 命令开始执行发送。

若 CSMA-CA 算法发现信道被占有，将重复此步骤直至 MAX_CSMA_RETRIES(寄存器，0x2C,XAH_CTRL_0)。如果 CSMA-CA 在 MAX_CSMA_RETRIES 之后未发现净信道，将取消 TX_ARET 操作，发出中断请求 IRQ_3(TRX_END)并在寄存器 TRAC_STATUS 位（寄存器 0x02,TRX_STATE）回复 CHANNEL_ACCESS_FAILURE。

在帧发送过程中，无线电收发器会解析 MAC 头（MHR）帧第 5 位以便校验是否要求 ACK 回复。若未要求 ACK，无线电收发器将在帧发送完成后直接发出 IRQ_3(TRX_END)。寄存器 TRAC_STATUS 为（寄存器 0x02,TRX_STATE）设置为 SUCCESS。

若要求 ACK，那么无线电收发器将在发送之后自动切换至接收模式，等待有效的 ACK 回复（即，匹配序列号和正确的 FCS）。在收到有效的 ACK 帧之后，将对此帧的未完成子字段进行解析，状态寄存器的 TRAC_STATUS 位相应地更新为 SUCCESS 或 SUCCESS_DATA_PENDING，参看表 5-15。同时，结束整个 TX_ARET 处理，并发出中断请求 IRQ_3(TRX_END)。

如果在暂停时限内未收到有效 ACK（参看 5.2.4.1 小节），无线电收发器将重试整个处理，（基于 CSMA-CA 的帧传输）直至帧重传次数上限已满，见寄存器 MAX_FRAME_RETRIES 位（寄存器 0x2C,XAH_CTRL_0）。在此情况下，TRAC_STATUS 变为 NO_ACK，TX_ARET 处理完成，并发出中断请求 IRQ_3(TRX_END)。

表 5-15 总结了与 TX_ARET 处理对于的在寄存器子字段 TRAC_STATUS 中（寄存器 0x02,TRX_STATE）的扩展操作模式结果代码。

表 5-15 寄存器 TRAC_STATUS 位的 TX_ARET 处理结果代码注释。

值	名称	说明
0	SUCCESS	处理收到有效 ACK 回复，或，在未要求 ACK 的情况下，在成功发送帧之后，显示此代码。
1	SUCCESS_DATA_PENDING	等同于 SUCCESS，并指示已设定接收帧的未完成位（见 6.1.2.2 小节）。
3	CHANNEL_ACCESS_FAILURE	在 CSMA-CA 达到 MAX_CSMA_RETRIES 之后信道仍被占用。
5	NO_ACK	在所有重传尝试中均为收到应答帧。
7	INVALID	进入 TX_ARET 模式直至发出 IRQ_3(TRX_END)

若 `MAX_CSMA_RETRIES=7`，则在不执行的 CSMA-CA 的情况下开始及时 TX_ARET 处理，此时可支持信标使能网络操作。而且，若不设定 `MAX_CSMA_RETRIES` 的值，则只执行一次帧发送。

请注意应答接收程序不会覆盖帧缓冲内容。在整个 TX_ARET 过程中均不会改动帧缓冲内的发送数据。自动删除接收帧，只保留应答帧。

5.2.4.1 应答暂停

若在帧发送之后须收到应答 (ACK) 帧，那么 AT86RF212 将设置一个暂停直至有效 ACK 帧到达。此暂停时限 (`macAckWaitDuration`) 的设置如[1]所述：

$$\text{macAckWaitDuration}[\text{符号周期}] = a\text{UnitBackoffPeriod} + a\text{TurnaroundTime} + \text{phySHRDuration} + 6 \cdot \text{phySymbolsPerOctet}$$

在此公式中，6 代表应答帧中的 PHY 标头八位字节加 PSDU 的八位字节。特别是执行 PHY 模式 (参看 7.1 小节) 的时候，此公式会产生下述值：

- BPSK: `macAckWaitDuration=120` 符号周期
- O-QPSK: `macAckWaitDuration=54` 符号周期

请注意在 PHY 模式中，所谓的[符号周期]指的都是相应同步标头的符号长度，有关符号周期的详细信息参看 7.1.3 小节。

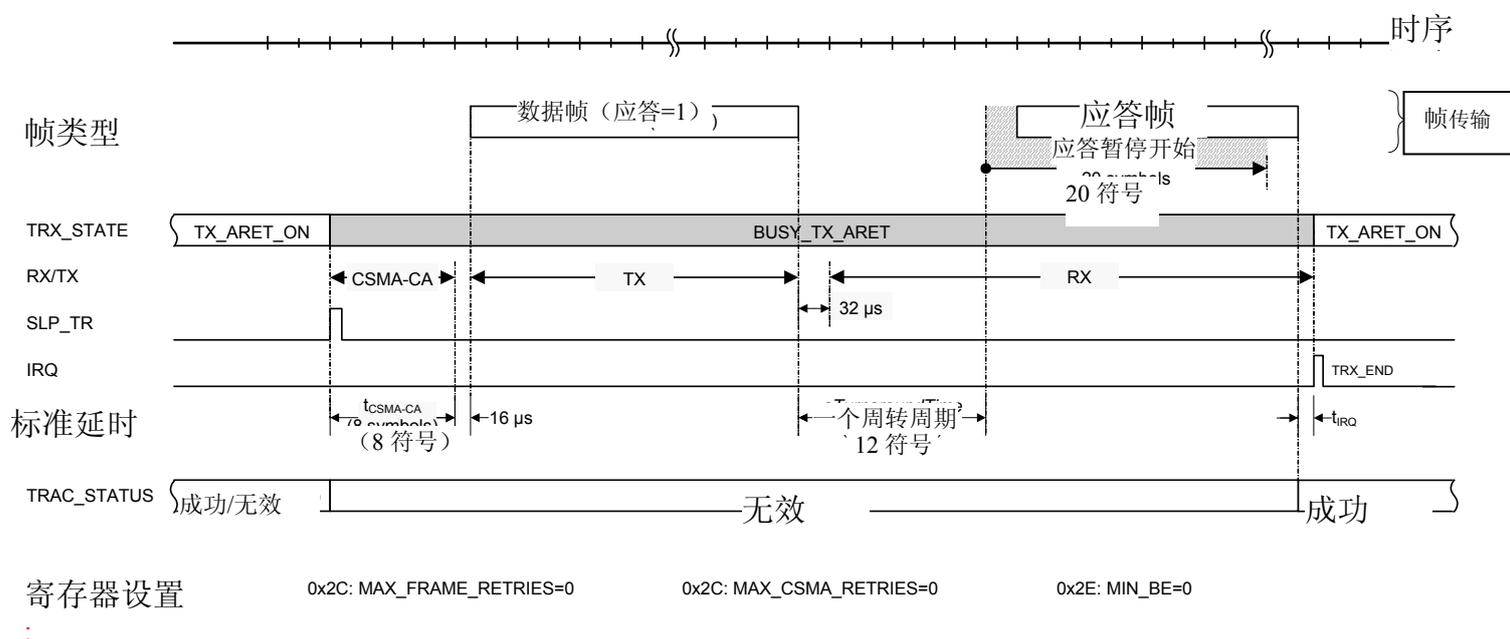
5.2.4.2 时序

TX_ARET 处理的时序示例见图 5-13。在此示例中，发送的是带有应答请求的数据帧。引脚 11 (SLP_TR) 启动帧传输。由于 `MIN_BE` 被设置为零，原 CSMA-CA 的避退周期长度也为零。因此，CSMA-CA 持续时间 `tCAMA-CA` 只有 8 个 CCA 测量周期符号。若 CCA 返回 IDLE (此例假设)，则表示帧已发送。

此后，AT86RF212 切换至接收模式并等待应答回复，即寄存器 `TRAC_STATUS` 子字段 (寄存器 `0x02, TRX_STATE`) 显示 `SUCCESS_WAIT_FOR_ACK`。在 `a TurnaroundTime+aUnitBackoff` (一个周转周期+一个单元避退周期) 之后，必须开始 ACK 帧的传输。在包括帧发送的整个处理过程中，等待 ACK 及 ACK 接收时，无线电收发器状态寄存器 `TRX_STATUS` (寄存器 `0x01, TRX_STATUS`) 将发送 `BUSY_TX_ARET` 信号。

中断请求 `IRQ_3(TRX_END)` 指示应答帧的成功接收。状态寄存器 `TRX_STATUS` (寄存器 `0x01, TRX_STATUS`) 转换为 `TX_ARET_ON`。同时，寄存器 `TRAC_STATUS` 转化为 `SUCCESS` 或 `SUCCESS_DATA_PENDING`。当应答帧的未完成子字段设置为 1 时，转换为后者。

图 5-13 TX_ARET 处理时序示例（无待 ACK 帧待处理数据位设置）



5.2.5 中断处理

扩展操作模式中的中断处理与基本操作模式中的相似，通过设置寄存器 0x0E (IRQ_MASK) 位的相应位激活中断。

在 RX_AACK 和 TX_ARET 模式中，存在下列指示帧接收与发送状态的中断请求：

- IRQ_2(RX_START)
- IRQ_3(TRX_END)
- IRQ_5(AMI)

在 RX_AACK 模式中，建议只激活中断请求 IRQ_3(TRX_END)。只在帧滤波器（见 6.2 小节）报告匹配地址及 FCS 有效（见 6.3 小节）时发出此中断请求。其他中断请求的使用可供备选。

在接收帧之后，RX_START 中断请求指示已找到正确的同步标头。随 PHR 之后发出此中断请求。

中断请求 AMI 指示地址匹配，参看 6.2 小节中的滤波器规则。

在接收帧之后，RX_START 中断指示检测到正确的同步标头 (SHR) 与非零 PHY 标头 (PHR)。在 PHR 之后发出此中断信号。

在 TX_ARET 处理过程中，无线电收发器会自动禁用多个中断请求。与 6.6 小节所述内容相反，CCA 算法 (CSMA-CA 的一部分) 不生成中断请求 IRQ_4(CCA_ED_READY)。而且，在 TX_ARET 应答接收的过程中不会生成中断请求 RX_START 和 AMI。

5.2.6 寄存器说明

寄存器概览

下列寄存器用于控制控制操作模式：

表 5-16 寄存器概览

寄存器地址	寄存器名称	说明
0x01	TRX_STATUS	无线电收发器状态, CCA 结果
0x02	TRX_STATE	无线电收发器状态控制, TX_ARET 状态
0x04	TRX_CTRL_1	TX_AUTO_CRC_ON
0x08	PHY_CC_CCA	CCA 模式控制, 见 6.6.6 小节
0x09	CCA_THRES	CCA ED 阈值设置, 见 6.6.6 小节
0x17	XAH_CTRL_1	RX_AACK 控制
0x20 – 0x2B		帧滤波器配置 -短地址, PAN ID 及 IEEE 地址 -参看 6.2.3 小节
0x2C	XAH_CTRL_0	TX_ARET 控制, 重传赋值控制
0x2D	CSMA_SEED_0	CSMA-CA 种子值
0x2E	CSMA_SEED_1	CSMA-CA 种子值, RX_AACK 控制
0x2F	CSMA_BE	CSMA-CA 避退指数控制

寄存器 0x01 (TRX_STATUS) :

只读寄存器 TRX_STATUS 显示无线电收发器的当前状态。通过在寄存器 TRX_CMD 位 (寄存器 0x02, TRX_STATE) 写入状态转换命令启动状态转换。

表 5-17 寄存器 0x01(TRX_STATUS)

位	7	6	5	4
名称	CCA_DONE	CCA_STATUS	预留	TRX_STATUS
读取/写入	R	R	R	R
复位值	0	0	0	0

位	3	2	1	0
名称	TRX_STATUS	TRX_STATUS	TRX_STATUS	TRX_STATUS
读取/写入	R	R	R	R
复位值	0	0	0	0

• 第 7 位-CCA_DONE

参看 6.6 小节,在扩展操作模式中不做更新

• 第 6 位-CCA_STATUS

参看 6.6 小节,在扩展操作模式中不做更新

• 第 5 位-预留**• 4: 0 位-TRX_STATUS**

寄存器 TRX_STATUS 位发出当前无线电收发器状态信号。

表 5-18 无线电收发器状态

寄存器位	值	状态说明
TRX_STATUS	0x00	P_ON
	0x01	BUSY_RX
	0x02	BUSY_TX
	0x06	RX_ON
	0x08	TRX_OFF(CLK 模式)
	0x09	PLL_ON (TX_ON)
	0x0F ⁽¹⁾	睡眠
	0x11	BUSY_RX_AACK
	0x12	BUSY_TX_ARET
	0x16	RX_AACK_ON
	0x19	TX_ARET_ON
	0x1C	RX_ON_NOCLK

	0x1D	RX_AACK_ON_NOCLK
	0x1E	BUSY_RX_AACK_NOCLK
	0x1F ⁽²⁾	STATE_TRANSITION_IN_PROGRESS
		所有其他值均为预留值

附注：1. 在睡眠状态下不可访问寄存器。

2. 请勿试图在无线电收发器处于 STATE_TRANSITION_IN_PROGRESS（状态转换处理中）的情况下开始另一个状态转换。

寄存器 0x02(TRX_STATE):

AT86RF212 无线电收发器状态由寄存器 TRX_STATE 通过寄存器 TRX_CMD 位控制。通过读取寄存器 TRX_STATUS 位（寄存器 0x01,TRX_STATUS）对成功的状态转换进行确认。只读寄存器 TRAC_STATUS 位指示扩展操作模式处理的状态或结果。

表 5-19 寄存器 0x02 (TRX_STATE)

位	7	6	5	4
名称	TRAC_STATUS	TRAC_STATUS	TRAC_STATUS	TRX_CMD
读取/写入	R	R	R	R/W
复位值	0	0	0	0

位	3	2	1	0
名称	TRX_CMD	TRX_CMD	TRX_CMD	TRX_CMD
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0

7: 5 位-TRAC_STATUS

寄存器 TRAC_STATUS 位指示 RX_AACK 及 TX_ARET 程序的状态。算法详细介绍及状态信息说明见于 5.2.3 小节和 5.2.4 小节。

表 5-20 TRAC_STATUS 处理状态

寄存器位	值	说明	RX_AACK	TX_ARET
TRAC_STATUS	0 ⁽¹⁾	SUCCESS	X	X
	1	SUCCESS_DATA_PENDING		X
	2	SUCCESS_WAIT_FOR_ACK	X	
	3	CHANNEL_ACCESS_FAILURE		X
	5	NO_ACK		X
	7 ⁽¹⁾	INVALID	X	X
			所有其他值均为预留值	

附注：1.即使寄存器 TRAC_STATUS 位的复位值为 0，当开始 RX_AACK 及 TX_ARET 程序时，程序也会将寄存器 TRAC_STATUS 位设置为=7（无效）。

• 4: 0 位—TRX_CMD

对寄存器 TRX_CMD 的写入访问启动无线电收发器的状态转换：

表 5-21 状态控制寄存器

寄存器位	值	状态转换至
TRX_CMD	0x00	NOP
	0x02	TX_START
	0x03	FORCE_TRX_OFF
	0x04 ⁽¹⁾	FORCE_PLL_ON
	0x06	RX_ON
	0x08	TRX_OFF(CLK 模式)
	0x09	PLL_ON (TX_ON)
	0x16	RX_AACK_ON
	0x19	TX_ARET_ON
		所有其他值均为预留值，设计为 NOP。

附注：1.FORCE_PLL_ON 在睡眠状态, P_ON 状态,复位状态, TRX_OFF 状态和所有的*_NOCLK 状态, 以及由 STATE_TRANSITION_IN_PROGRESS（状态转换处理中）转换为上述状态时无效。

寄存器 0x04 (TRX_CTRL_1)

TRX_CTRL_1 寄存器为多功能寄存器，用于控制多个操作模式和无线电收发器的设置

表 5-22 寄存器 0x04 (TRX_CTRL_1)

位	7	6	5	4
名称	PA_EXT_EN	IRQ_2_EXT_EN	TX_AUTO_CRC_ON	RX_BL_CTRL
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	1	0
位	3	2	1	0
名称	SPI_CMD_MODE	SPI_CMD_MODE	SPI_CMD_MODE	IRQ_POLARITY
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0

- **第 7 位-PA_EXT_EN**

参看 9.4 小节。

- **第 6 位-IRQ_2_EXT_EN**

参看 9.5 小节。

- **第 5 位-TX_AUTO_CRC_ON**

如设置，则寄存器 TX_AUTO_CRC_ON 位将自动生成 FCS。详细信息请参看 6.3 小节。

- **第 4 位-RX_BL_CTRL**

参看 9.6 小节。

- **第 3: 2 位-SPI_CMD_MODE**

参看 4.4.1 小节。

- **第 1 位-IRQ_MASK_MODE**

参看 4.7 小节

- **第 0 位-IRQ_POLARITY**

参看 4.7 小节

寄存器 0x17 (XAH_CTRL_1) :

XAH_CTRL_1 寄存器是扩展操作模式的控制寄存器。

表 5-23 寄存器 0x17 (XAH_CTRL_1) :

位	7	6	5	4
名称	预留	CSMA_LBT_MODE	AACK_FLTR_RES_FT	AACK_UPLD_RES_FT
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0

位	3	2	1	0
名称	预留	AACK_ACK_TIME	AACK_PROM_MODE	预留
读取/写入	R	R/W	R/W	R
复位值	0	0	0	0

- **第 7 位-预留**

- **第 6 位-CSMA_LBT_MODE**

参看 6.7.3 小节。

- **第 5 位-AACK_FLTR_RES_FT**

只在 AACK_UPLD_RES_FT=1 时，设置此寄存器位。

若 AACK_FLTR_RES_FT=1，将按照 IEEE 802.15.4-2006 标准，第 7.2.1.1.1 小节的规定，对预留帧类型进行与数据帧类似的滤波处理。在通过帧滤波器之后，发出中断请求 IRQ_5(AMI),参看 6.2 小节。

若 AACK_FLTR_RES_FT=0，则只对接收的预留帧进行有效 FCS 校验。

- **第 4 位-AACK_UPLD_RES_FT**

若 AACK_UPLD_RES_FT=1，将对预留帧进行进一步处理并屏蔽接收帧。若接收帧的 FCS 有效，则生成中断请求 IRQ_3(TRX_END)。

若结合 AACK_FLTR_RES_FT 位的配置，则将在 RX_AACK 处理中将此等帧作为 IEEE802.15.4 的合规数据帧处理。

反之，若 AACK_UPLD_RES_FT=0，则会锁定带有预留帧类型的帧。

- 第 3 位-预留
- 第 2 位-AACK_ACK_TIME

按照 IEEE 802.15.4 标准，第 7.5.6.4.2 小节的规定，在收到数据或 MAC 命令帧的最后一个符号后 12 个符号周期（一个周转周期），开始应答帧发送。提供将寄存器 AACK_ACK_TIME 位的值复位，执行此操作。

或者，在 AACK_ACK_TIME=1 时，可将应答回复时间相应缩短，如表 5-24 所示。

表 5-24 缩短 ACK 回复时间 (AACK_ACK_TIME=1)

PHY 模式	ACK 回复时间[符号周期]
BPSK-20, OQPSK-{100,200,400}	2
BPSK-40, OQPSK-{250,500,1000}	3

缩短的 ACK 回复时间专门用于高数据传输速率模式，参看 7.1.4 小节。

- 第 1 位-AACK_PROM_MODE

寄存器 AACK_PROM_MODE 位激活 RX_AACK 模式中的混杂模式；参看 IEEE 802.15.4-2006 标准，第 7.5.6.5 小节。

若设置此位，那么即使不符合第三级滤波器规则或 FCS 无效，含有效 PHR 的输入帧仍会生成中断请求 IRQ_3(TRX_END)。但是，寄存器 RX_CRC_VALID 位（寄存器 0x06）应做相应设置。

若帧通过第三级滤波器规则，将生成并发送应答帧，但寄存器 AACK_DIS_ACK 位（寄存器 0x2E,CSMA_SEED_1）可取消此操作。

- 第 0 位-预留

寄存器 0x2C(XAH_CTRL_0):

寄存器 0x2C(XAH_CTRL_0)是扩展操作模式中的控制寄存器。

表 5-25 寄存器 0x2C(XAH_CTRL_0)

位	7	6	5	4
名称	MAX_FRAME_RETRIES			
读取/写入	R/W			
复位值	0	0	1	1

位	3	2	1	0
名称	MAX_CSMA_RETRIES			SLOTTED_OPERATION
读取/写入	R/W			R/W
复位值	1	0	0	0

• **7:4 位-MAX_FRAME_RETRIES**

MAX_FRAME_RETRIES 的设置规定了在接收器未收到应答时，TX_ARET 模式中的帧自动重传尝试次数。

• **3:1 位-MAX_CSMA_RETRIES**

MAX_CSMA_RETRIES 规定了在取消处理之前，在 TX_ARET 模式中重复 CSMA_CA 程序的次数。按照 IEEE802.15.4 的规定，MAX_CSMA_RETRIES 的有效范围为[0, 1, ..., 5]。

若 MAX_CSMA_RETRIES=7，则会开始即时帧发送，不执行 CSMA-CA。这可能需要特别的开槽应答操作。MAX_CSMA_RETRIES=6 为预设值。

• **第 0 位-SLOTTED_OPERATION**

如果设置此位，那么 SLOTTED_OPERATION 位将激活卡槽操作模式中的 RX_AACK 应答生成，参看 5.2.3.5 小节。

如果在信标使能网络或开槽运行模式中使用 RX_AACK 模式，参看 IEEE802.15.4-2006,第 5.5.1 小节,那边寄存器 SLOTTED_OPERATION 位会指示将在退避槽边界发送应答帧（卡槽应答）。

如果设置此寄存器位，那么微控制器将通过引脚 11（SLP_TR）的上升沿开始应答帧发送。

寄存器 0x2D(CSMA_SEED_0):

CSMA_SEED_0 寄存器是 TX_ARET 控制寄存器，含有 CSMA-CA 算法的部分 CSMA 种子。

表 5-26 寄存器 0x2D(CSMA_SEED_0)

位	7	6	5	4	3	2	1	0
名称	CSMA_SEED_0[7:0]							
读取/写入	R/W							
复位值	1	1	1	0	1	0	1	0

• **7:0 位-CSMA_SEED_0**

此寄存器含有 CSMA_SEED 的后八位，即[7: 0]。前三位是寄存器 CSMA_SEED_1 位的一部分（寄存器 0x2E,CSMA_SEED_1）。CSMA_SEED 是随机数生产的种子，用于决定 CSMA-CA 算法中的退避周期长度。

建议使用随机值对寄存器 CSMA_SEED 进行初始化。可通过寄存器 RND_VALUE 位（寄存器 0x06,PHY_RSSI）执行此操作，参看 9.2 小节。

寄存器 0x2E (CSMA_SEED_1):

寄存器 CSMA_SEED_1 含有部分 CSMA-CA 算法的 CSMA 种子，以及帧滤波器和 RX_AACK 处理的控制位。

表 5-27 寄存器 0x2E (CSMA_SEED_1)

位	7	6	5	4
名称	AACK_FVN_MODE	AACK_FVN_MODE	AACK_SET_PD	AACK_DIS_ACK
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	1	0	0

位	3	2	1	0
名称	AACK_I_AM_COORD	CSMA_SEED_1	CSMA_SEED_1	CSMA_SEED_1
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	1	0

• 7: 6 位-AACK_FVN_MODE

MAC 标头 (MHR) 的帧控制字段含有一个帧版本号子字段。AACK_FVN_MODE 设置规定了 AT86RF212 的帧过滤处理和应答操作。无线电收发器按照此等寄存器位的内容使带有指定帧版本号，号组群的帧通过，或忽略帧版本号。

因此，寄存器 AACK_FVN_MODE 位负责设定可接受的帧版本号最大值。帧版本号超过设定值的接收帧不能通过帧滤波器，因而不予应答。

表 5-28 帧版本号子字段决定帧应答

寄存器位	值	说明
AACK_FVN_MODE	0	版本号为 0 的应答帧
	1	版本号为 0 或 1 的应答帧
	2	版本号为 0 或 1 或 2 的应答帧
	3	所有帧版本号的应答

请注意按照 IEEE802.15.4-2006,第 7.2.2.3.1 小节——应答帧 MHR 字段的规定,应答帧的帧版本号被设置为 0x00。

• 第 5 位-AACK_SET_PD

若向数据请求 MAC 命令帧发出应答，则会将 AACK_SET_PD 位的内容复制到应答帧的帧未完成子字段中。

此外，如果寄存器 AACK_FVN_MODE 位（寄存器 0x2E,CSMA_SEED_1）被设置为接受帧版本号非 0 或 1 的帧，那么寄存器 AACK_SET_PD 位的内容也会复制到任何针对帧版本为 2 或 3 且安全使能子字段为 1 的 MAC 命令帧的应答帧未完成子字段中。

此操作的假设前提是标准值[1]的将来版本会改变辅助安全标头的长度或结构，因此，无法安全地检测 MAC 命令帧实际上是否是数据请求命令。

• **第 4 位-AACK_DIS_ACK**

如果设置此位，则在 RX_AACK 扩展操作模式下不发送任何应答帧（即使请求应答）。

• **第 3 位-AACK_I_AM_COORD**

如果节点为 PAN 网络协调器，则必须设置此寄存器位。此位用于 RX_AACK 模式下的帧过滤处理。

若 I_AM_COORD=1 且数据或 MAC 命令帧中含有源地址寻址字段，那么只接受 PAN 网络协调器发出的源 PAN 标识符与 macPANId 匹配的帧，详情参看 IEEE802.15.4,第 7.5.6.2 小节（三级滤波器规则 6）。

• **2: 0 位—CSMA_SEED_1**

此等寄存器位是 CSMA_SEED 的前 3 位，[10: 8]。其后一部分在寄存器 0x2D(CSMA_SEED_0) 中，详情请参看寄存器 CSMA_SEED_0。

寄存器 0x2F (CSMA_BE):

表 5-29 寄存器 0x2F(CSMA_BE)

位	7	6	5	4
名称	MAX_BE	MAX_BE	MAX_BE	MAX_BE
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	1	0	1

位	3	2	1	0
名称	MIN_BE	MIN_BE	MIN_BE	MIN_BE
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	1	1

• **7: 4 位-MAX_BE**

寄存器 MAX_BE 位设定在 CSMA-CA 算法中的退避指数最大值，应等于 macMaxBE,(参看 7.5.1.4 小节的表 71-[1])。有效值为[4'd8,4'd7,...,4'd3]。

• **3: 0 位-MIN_BE**

寄存器 MIN_BE 位设定在 CSMA-CA 算法中的退避指数最小值，应等于 macMinBE,(参看 7.5.1.4 小节的表 71-[1])。

有效值为[MAX_BE,(MAX_BE-1),...,4'd0]。

附注

- 若 MIN_BE=0 且 MAX_BE=0，则 CCA 退避周期总为 0。

6. 功能介绍

6.1 序言-IEEE802.15.4-2006 帧结构

图 6-1 为 IEEE802.15.4-2006 标准定义的物理层 (PHY) 帧结构概览。图 6-2 为介质访问控制层 (MAC) 帧结构。

图 6-1 IEEE802.15.4 帧结构-PHY 层帧结构

PHY 协议数据单元 (PPDU)			
前导序列	SFD	帧长度	PHY 载荷
5 octets 同步标头 (SHR)		1 octet (PHR)	最大值 127 为 octets 的 PHY 载荷 PHY 服务数据单元 (PSDU) MAC 协议数据单元 (MPDU)

6.1.1 PHY 协议数据单元 (PPDU)

6.1.1.1 同步化标头 (SHR)

SHR 由四个八位字节的导言字段 (全为零), 加一个八位字节的帧起始定界符 (SFD) 组成。在发送过程中, AT86RF212 自动生成 SHR, 因此帧缓冲只含有 PHR 和 PSDU, 参看 4.3.2 小节。

SHR 的发送分别需要 40 个二相相移键控 (BPSK) 调制符号和 10 个偏移四相移相键控 (O-QPSK) 调制符号。表 6-1 列出了所选数据传输速率决定的 SHR 持续时间, 也可参看 10.5 小节。

由于 SPI 数据率通常高于无线数据传输速率, 因此微控制器可以在帧缓冲写入访问完成之前开始发送。

在帧接收过程中, SHR 用于实现同步化。匹配 SFD 设定 PHR 的开始和后来的 PSDU 载荷数据。

6.1.1.2 PHY 标头 (PHR)

PHY 标头是 SHR 后面的八位字节。较次要的 7 位用于标示后面的 PSDU 帧长度, 八位中最主要的一位为预留位, 按照 IEEE802.15.4 的合规帧要求, 应设置为 0。即使保存 MSB, AT86RF212 也能发送及收到该字节。

在发送模式中, 当进行帧缓冲写入访问时, 须将 PHR 作为发送的第一个八位字节, 参看 4.3.2 小节。

在接收模式中, 当进行帧缓冲读取访问时, PHR 是返回的第一个八位字节, 参看 4.3.2。

6.1.1.3 PHY 载荷 (PHY 服务数据单元, PSDU)

PSDU 的可变长度在 1 个八位字节至 127 八位字节之间。PSDU 含有 MAC 协议数据单元 (MPDU), 其中最后两个八位字节用于帧校验序列 (FCS), 参看 6.3 小节。

6.1.1.4 时序总结

表 6-1 为所选数据传输速率决定的上述帧结构时序信息。

表 6-1 PPDU 时序

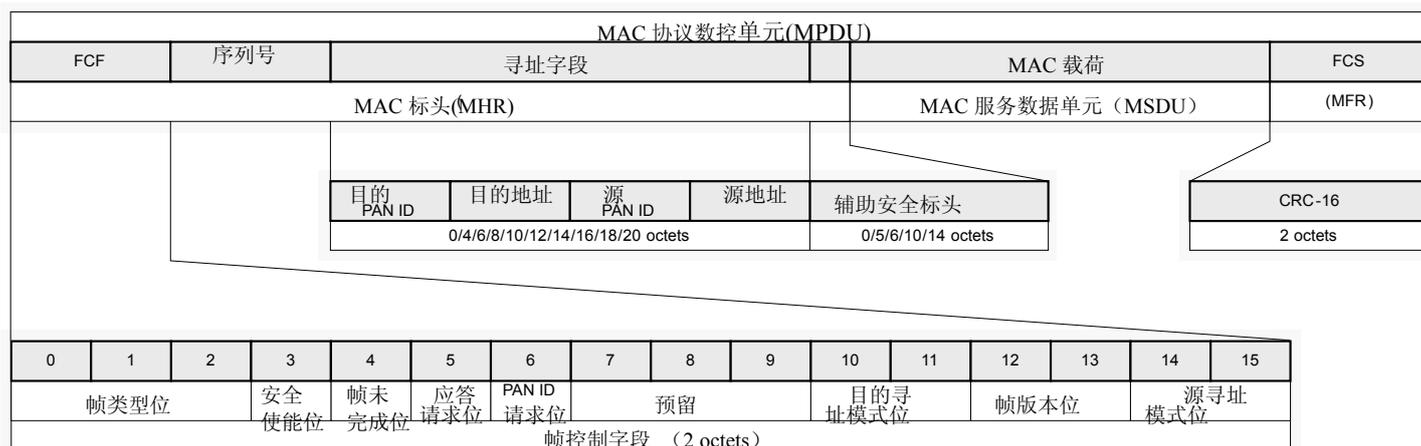
PHY 模式	PSDU 位速	标头位速	持续时间		
	率[kbit/s]	率[kbit/s]	SHR[μ s]	PHR[μ s]	PSDU 最大值[ms]
BPSK ⁽¹⁾	20	20	2000	400	50.8
	40	40	1000	200	25.4
O-QPSK ⁽¹⁾	100	100	300	80	10.16
	250	250	160	32	4.064
O-QPSK ⁽²⁾	200	100	300	80	5.08
	400	100	300	80	2.54
	500	250	160	32	2.032
	1000	250	160	32	1.016

附注： 1. 依照 IEEE802.15.4-2006 标准，见[1]
2. 高数据传输模式，见 7.1.4 小节。

6.1.2 MAC 协议数据单元 (MPDU)

图 6-2 为 MAC 层的帧结构。

图 6-2 IEEE802.15.4-2006 标准帧结构-MAC 层帧结构



6.1.2.1 MAC 标头 (MHR)

MAC 标头由帧控制字段 (FCF)，序列号和长度可变的寻址字段组成。

6.1.2.2 帧控制字段 (FCF)

FCF 为 MPDU 的前两个八位字节。

[2: 0]位：表示“帧类型”。表 6-2 列出了 7.2.1.1.1 小节的[1]规定的帧类型。

表 6-2 帧类型字段

帧类型值		说明
b2 b1 b0	值	
000	0	信标
001	1	数据
010	2	应答
011	3	MAC 命令
100-111	4-7	预留

上述为用于第三级滤波器规则的帧过滤处理，参看 7.2.1.1.1 小节[1]。

第 3 位指示此帧是否应用安全处理。该字段由帧滤波器评估。

第 4 位是“帧未完成”子字段。可在应答帧中设置该字段以便通知接收应答帧的节点：应答帧发送节点还有数据要发送。

第 5 位是“应答请求”子字段。如果在非广播数据或 MAC 命令帧中设定该字段，那么接收方须在 IEEE802.15.4 标准规定的时间内发送帧接收应答（即，12 个非信标使能网络符号内）。

第 6 位“PAN ID 压缩”子字段表示在一个含有目的地址和源地址的帧内，省略源寻址字段的 PAN ID。AT86RF212 的帧滤波器负责对此位进行评估。

[9: 7]位：预留

[11: 10]位：“目的寻址模式”子字段描述的是帧的目的地址结构。IEEE802.15.4 规定的地址模式值总结见于表 6-3：

表 6-3 目的寻址模式与源寻址模式

寻址模式值		说明
b11 b10	值	
00	0	没有 PAN 标识符与地址字段。
01	1	预留
10	2	地址字段含 16 位短地址
11	3	地址自动含 64 位长地址

如果目的地址模式为 2 或 3，即目的地址存在，那么寻址字段应由 16 位 PAN ID 加 16/64 位（依模式而定）的地址组成。

[13: 12]位：“帧版本”子字段规定帧对应的版本号，见表 6-4。按照 IEEE-802.15.4-2003 标准的规定，它们是预留位。

该子字段应设置为 0x00，以说明帧与 IEEE802.15.4-2003 标准相符，或设为 0x01，以表示该帧为 IEEE802.15.4 标准帧。其余各子字段值均预留为将来使用。关于帧兼容性的详细信息，请参看 7.2.3 小节[1]。

表 6-4 帧版本字段

帧版本值		说明
b13 b12	值	
00	0	符合 IEEE-802.15.4-2003 标准的帧
01	1	符合 IEEE-802.15.4-2006 标准的帧
10	2	预留
11	3	预留

[15: 14]位是“源寻址模式”子字段，意义与“目的寻址模式”相同。
FCF (0-2, 3, 6, 10-15) 的寻址字段描述位将影响 AT86RF212 的帧滤波器，参看 6.2 小节。

6.1.2.3 IEEE802.15.4 标准 2003 与 2006 修订版的帧兼容性

符合 IEEE802.15.4-2006 标准的所有非安全帧与符合 IEEE802.15.4-2003 标准的非安全帧兼任，但以下两种情况除外：带有信道页字段的协调器重排命令帧（见 7.3.8 小节[1]）和任何 MAC 载荷字段大于 MAC 安全载荷长度最大值的帧。

安全帧兼容性见表 6-5，其中标出了 IEEE802.15.4-2003 和 IEEE802.15.4-2006 标准的安全操作模式。

表 6-5 帧兼容性

帧控制字段位指定		说明
安全使能 b ₃	帧版本 b ₁₃ b ₁₂	
0	00	非安全。帧可兼容于 IEEE802.15.4-2003 和 IEEE802.15.4-2006 标准。
0	01	非安全。帧不可兼容于 IEEE802.15.4-2003 和 IEEE802.15.4-2006 标准。
1	00	符合 IEEE802.15.4-2003 标准规定结构的安全帧。IEEE802.15.4-2006 标准不支持此帧类型。
1	01	符合 IEEE802.15.4-2006 标准规定结构的安全帧

6.1.2.4 序列号

FCF 后面的八位字节长序列号为指定帧标示，以便检测重复的帧发送。在 RX_ACK 状态下，会将接收帧该字段的内容复制到应答帧中。

6.1.2.5 寻址字段

寻址字段含有多个地址以便进行地址匹配指示。目的地址（如果有）总为第一个，其后是源地址（如果有）。每个地址字段均由 PAN ID 和设备地址组成。若两个地址都有，那么 FCF 中的“PAN ID 压缩”子字段保留一个 PAN ID，源 PAN ID 被省略。

请注意除了上述基本规则，IEEE802.15.4 标准还规限了不同 MAC 帧类型的有效地址组合。例如，只有应答帧可出现省略两个地址的情况（源寻址模式=0 且目的寻址模式=0）。AT86RF212 的帧滤波器被设计应用于 IEEE802.15.4 标准的合规帧。可对单片机进行配置以便处理其他帧结构和例外情况。

6.1.2.6 辅助安全标头

辅助安全标头在 MHR 的最后。该字段长度不定，用于设定安全处理所需信息，包括帧的实际保护方法（安全等级）和使用的 MAC 安全 PIB 关键要素（见 7.6.1 小节[1]）。只有在安全使能字段 b3（见 6.1.2.3 小节）设置为 1 时，才会显示此字段。有关结构设置的详细信息，请参看 7.6.2 小节[1]。

6.1.2.7 MAC 服务数据单元 (MSDU)

此为实际 MAC 载荷。其结构通常符号 IEEE802.15.4 标准中规定的独立帧类型描述。

6.1.2.8 MAC 页脚 (MFR)

MAC 页脚由两个八位字节的帧校验和 (FCS) 组成，详情参看 6.3。

6.2 帧滤波器

帧过滤是评估接收的帧是否与预设标准相符的程序，如源地址，目的地址或帧类型。按照 IEEE802.15.4-2006 标准的 7.5.6.2 小节的规定（第三级过滤），过滤程序用于接收帧并生成地址匹配中断请求 IRQ_5(AMI)。

AT86RF212 帧滤波器只允许符合下列所有要求/规则（引自 IEEE802.15.4-2006,7.5.6.2 小节）的帧通过：

1. 帧类型子字段不得含有预留帧类型。
2. 帧版本子字段不得含有预留值。
3. 如果帧含有目的 PAN 标识符，那么 PAN 标识符应与 macPANId 匹配或为广播 PAN 标识符 (0xFFFF)。
4. 如果帧含有短目的地址，那么该地址应与 macShortAddress 或广播地址 (0xFFFF) 匹配。反之，若帧含有长目的地址，则该地址应与 aExtendedAddress 匹配。
5. 如果帧类型为信标帧，那么源 PAN 标识符应与 macPANId 匹配，除非 macPANId 等于 0x ffff，在此情况下，无论源 PAN 标识符是什么均应接收信标帧。
6. 如果只有数据或 MAC 命令帧含有源寻址字段，那么只能接受 PAN 网络协调器发出的源 PAN ID 与 macPANId 匹配的帧。

此外，AT86RF212 还有两项附加要求：

7. 帧类型不得为应答 (ACK) 帧。
8. 至少应设置一个地址字段。

此外，接收帧的 FCF 还按照以下规则控制地址匹配，（由中断请求 IRQ_5(AMI)指示）：

如果目的寻址模式为 0/1，源寻址模式为 0（见 6.1.2.2 小节），那么将不生成中断请求 IRQ_5。这样就不会发出任何应答帧。

为了与 IEEE802.15.4-2003 标准后向兼容，可通过寄存器 AACK_FVN_MODE 位（寄存器 0x2E,CSMA_SEED_1）取消第三级滤波器规则 2（帧版本）。

在扩展操作模式和基本操作模式中均可使用帧过滤。通过帧滤波器的帧会生成中断请求 IRQ_5(AMI)（如果未屏蔽）。

附注

- 滤波器规则 1 受寄存器 AACK_FLTR_RES_FT 位和 AACK_UPLD_RES_FT 位影响，见 6.2.3 小节。
- 滤波器规则 2 受寄存器 AACK_FVN_MODE 位影响，见 6.2.3 小节。

6.2.1 配置

如表 6-6 所述，可通过适当的帧滤波器地址变量和附加属性设置进行帧滤波器配置。

表 6-6 帧滤波器配置

寄存器地址	寄存器位	名称	说明
0x20,0x21 0x22,0x23 0x24 ... 0x2B	7:0	SHORT_ADDR_0/1 PAN_ADDR_0/1 IEEE_ADDR_0 ... IEEE_ADDR_7	按照 [1] 所述，设置 macShortAddress,macPANId 和 aExtendedAddress
0x17	1	AACK_PROM_MODE	0:禁用混杂模式 1: 启用混杂模式
0x17	4	AACK_UPLD_RES_FT	0: 禁用预留帧类型接收 1: 启用预留帧类型接收
0x17	5	AACK_FLTR_RES_FT	滤波器预留帧类型，与数据帧类型相似，见 6.2.2 小节 0:禁用 1: 启用
0x2E	7:6	AACK_FVN_MODE	FCF 帧版本号决定的帧接受标准 b00: 只接受版本号为 0 的帧，即符合 IEEE802.15.4-2003 的帧 b01:只接受版本号为 0 或 1 的帧，即符合 IEEE802.15.4-2006 的帧 b10:只接受版本号为 0 或 1 或 2 的帧 b11:接受所有帧，忽略 FCF 帧版本号

6.2.2 预留帧类型处理

如 5.2.3.3 小节所述，应按照寄存器 0x17(XAH_CTRL_1)的 AACK_UPLD_RES_FT 位和 AACK_FLTR_RES_FT 位对预留帧类型进行处理，共有三种选项：

1. AACK_UPLD_RES_FT=1,AACK_FLTR_RES_FT=0:

如果帧带有 FCS 正确的预留帧类型，将发出中断请求 IRQ_3(TRX_END)。不对这些帧应用其他帧过滤。不生成 IRQ_5(AMI)，也不发送应答。

2. AACK_UPLD_RES_FT=1,AACK_FLTR_RES_FT=1

如果 AACK_FLTR_RES_FT=1，那么 RX_AACK 帧滤波器将把所有含预留帧类型的帧当作 IEEE802.15.4 标准合规数据帧进行处理。这表示将在地址匹配之后生成 IRQ_5(AMI)。

3. AACK_UPLD_RES_FT=0

锁定所有含预留帧类型的帧。

6.2.3 寄存器说明

寄存器 (0x17) (XAH_CTRL_1):

XAH_CTRL_1 寄存器是扩展操作模式的控制寄存器。

表 6-7 寄存器 0x17 (XAH_CTRL_1) :

位	7	6	5	4
名称	预留	CSMA_LBT_MODE	AACK_FLTR_RES_FT	AACK_UPLD_RES_FT
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0

位	3	2	1	0
名称	预留	AACK_ACK_TIME	AACK_PROM_MODE	预留
读取/写入	R	R/W	R/W	R
复位值	0	0	0	0

- 第 7 位-预留

- 第 6 位-CSMA_LBT_MODE

参看 6.7.3 小节。

- 第 5 位-AACK_FLTR_RES_FT

只在 AACK_UPLD_RES_FT=1 时，设置此寄存器位。

若 AACK_FLTR_RES_FT=1，那么 RX_AACK 帧滤波器将把所有含预留帧类型的帧当作 IEEE802.15.4 标准合规数据帧进行处理。

若 AACK_FLTR_RES_FT=0，则只对接收的预留帧进行有效 FCS 校验。

详情参看 6.2.2 小节。

- 第 4 位-AACK_UPLD_RES_FT

若 AACK_UPLD_RES_FT=1，则不锁定表示为预留帧的接收帧。

详情参看 6.2.2 小节。

- 第 3 位-预留

- **第 2 位-AACK_ACK_TIME**

参看 5.2.3.3 小节

- **第 1 位-AACL_PROM_MODE**

参看 5.2.6 小节。

- **第 0 位-预留**

寄存器 0x20 (SHORT_ADDR_0)

此寄存器含有帧滤波器地址识别的 16 位短地址的后 8 位，即[7: 0]位。

表 6-8 寄存器 0x20(SHORT_ADDR_0)

位	7	6	5	4	3	2	1	0
名称	SHORT_ADDRESS_0[7:0]							
读取 / 写入	R/W							
复位值	1	1	1	1	1	1	1	1

寄存器 0x21 (SHORT_ADDR_1):

此寄存器含有帧滤波器地址识别的 16 位短地址的前 8 位，即[15: 8]位。

表 6-9 寄存器 0x21 (SHORT_ADDR_1)

位	7	6	5	4	3	2	1	0
名称	SHORT_ADDRESS_1[7:0]							
读取/写入	R/W							
复位值	1	1	1	1	1	1	1	1

寄存器 0x22 (PAN_ID_0):

此寄存器含有帧滤波器地址识别的 MAC PAN ID 的后 8 位，即[7: 0]位。

表 6-10 寄存器 0x22 (PAN_ID_0)

位	7	6	5	4	3	2	1	0
名称	PAN_ID_0[7:0]							
读取/写入	R/W							
复位值	1	1	1	1	1	1	1	1

寄存器 0x23 (PAN_ID_1):

此寄存器含有帧滤波器地址识别的 MAC PAN ID 的前 8 位，即[15: 8]位。

表 6-11 寄存器 0x23 (PAN_ID_1)

位	7	6	5	4	3	2	1	0
名称	PAN_ID_1[7:0]							
读取/写入	R/W							
复位值	1	1	1	1	1	1	1	1

寄存器 0x24 (IEEE_ADDR_0):

此寄存器含有帧滤波器地址识别的 64 位 IEEE 扩展地址的[7: 0]位。

表 6-12 寄存器 0x24 (IEEE_ADDR_0)

位	7	6	5	4	3	2	1	0
名称	IEEE_ADDR_0[7:0]							
读取 / 写入	R/W							
复位值	0	0	0	0	0	0	0	0

寄存器 0x25 (IEEE_ADDR_1):

此寄存器含有帧滤波器地址识别的 64 位 IEEE 扩展地址的[15: 8]位。

表 6-13 寄存器 0x25 (IEEE_ADDR_1)

位	7	6	5	4	3	2	1	0
名称	IEEE_ADDR_1[7:0]							
读取 / 写入	R/W							
复位值	0	0	0	0	0	0	0	0

寄存器 0x26 (IEEE_ADDR_2):

此寄存器含有帧滤波器地址识别的 64 位 IEEE 扩展地址的[23: 16]位。

表 6-14 寄存器 0x26 (IEEE_ADDR_2)

位	7	6	5	4	3	2	1	0
名称	IEEE_ADDR_2[7:0]							
读取 / 写入	R/W							
复位值	0	0	0	0	0	0	0	0

寄存器 0x27 (IEEE_ADDR_3):

此寄存器含有帧滤波器地址识别的 64 位 IEEE 扩展地址的[31: 24]位。

表 6-15 寄存器 0x27 (IEEE_ADDR_3)

位	7	6	5	4	3	2	1	0
名称	IEEE_ADDR_3[7:0]							
读取 / 写入	R/W							
复位值	0	0	0	0	0	0	0	0

寄存器 0x28 (IEEE_ADDR_4):

此寄存器含有帧滤波器地址识别的 64 位 IEEE 扩展地址的[39: 32]位。

表 6-16 寄存器 0x28 (IEEE_ADDR_4)

位	7	6	5	4	3	2	1	0
名称	IEEE_ADDR_4[7:0]							
读取 / 写入	R/W							
复位值	0	0	0	0	0	0	0	0

寄存器 0x29 (IEEE_ADDR_5):

此寄存器含有帧滤波器地址识别的 64 位 IEEE 扩展地址的[47: 40]位。

表 6-17 寄存器 0x29 (IEEE_ADDR_5)

位	7	6	5	4	3	2	1	0
名称	IEEE_ADDR_5[7:0]							
读取 / 写入	R/W							
复位值	0	0	0	0	0	0	0	0

寄存器 0x2A (IEEE_ADDR_6):

此寄存器含有帧滤波器地址识别的 64 位 IEEE 扩展地址的[55: 48]位。

表 6-18 寄存器 0x2A (IEEE_ADDR_6)

位	7	6	5	4	3	2	1	0
名称	IEEE_ADDR_6[7:0]							
读取 / 写入	R/W							
复位值	0	0	0	0	0	0	0	0

寄存器 0x2B (IEEE_ADDR_7):

此寄存器含有帧滤波器地址识别的 64 位 IEEE 扩展地址的[63: 56]位。

表 6-19 寄存器 0x2B (IEEE_ADDR_7)

位	7	6	5	4	3	2	1	0
名称	IEEE_ADDR_7[7:0]							
读取 / 写入	R/W							
复位值	0	0	0	0	0	0	0	0

寄存器 0x2E (CSMA_SEED_1)

寄存器 CSMA_SEED_1 是 RX_AACK 的控制寄存器，含有 CSMA-CA 算法的部分 CSMA 种子，及帧滤波器和 RX_AACK 处理的控制位。

表 6-20 寄存器 0x2E (CSMA_SEED_1)

位	7		6		5		4	
名称	AACK_FVN_MODE		AACK_FVN_MODE		AACK_SET_PD		AACK_DIS_ACK	
读取 / 写入	R/W		R/W		R/W		R/W	
复位值	0		1		0		0	

位	3	2	1	0
名称	AACK_I_AM_COORD	CSMA_SEED_1	CSMA_SEED_1	CSMA_SEED_1
读取/ 写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位 值	0	0	1	0

• **7: 6位-AACK_FVN_MODE**

MAC 标头 (MHR) 的帧控制字段含有一个帧版本号子字段。AACK_FVN_MODE 设置规定了 AT86RF212 的帧过滤和应答操作。无线电收发器按照此等寄存器位的内容让带有指定帧版本号的帧通过。

因此, 寄存器 AACK_FVN_MODE 位定义了可接受帧版本的最大值。带有高于配置值的帧版本号的接收帧不能通过帧滤波器, 因此不予应答。

表 6-21 帧版本号子字段决定帧应答

寄存器位	值	说明
AACK_FVN_MODE	0	版本号为 0 的应答帧
	<u>1</u>	版本号为 0 或 1 的应答帧
	2	版本号为 0 或 1 或 2 的应答帧
	3	所有除了帧版本号以外的帧

• **第 5 位-AACK_SET_PD**

参看 5.2.6 小节。

• **第 4 位-AACK_DIS_ACK**

参看 5.2.6 小节。

• **第 3 位-AACK_I_AM_COORD**

参看 5.2.6 小节。

• **2: 0 位—CSMA_SEED_1**

参看 5.2.6 小节。

6.3 帧校验序列 (FCS)

FCS 机制采用国际电信联盟-电信标准化部门 (ITU-T) 的循环冗余校验 (CRC), 可用于检测帧中的错误。

6.3.1 概览

FCS 设计用于在 MAC 层中检测冲突帧。它的计算方法是将 ITU-T CRC 多项式应用到长度字节 (MHR 和 MSDU 字段) 后的所有已发送/已接收字节。FCS 长度为 16 位, 位于 PSDU 的最后 16 位。

默认为 AT86RF212 产生并在发送过程中自动插入 FCS 的 16 位字段。可将寄存器 TX_AUTO_CRC_ON 设置为=0(寄存器 0x04, TRX_CTRL_1)以便取消此操作。

在帧接收过程中, 会一直执行自动 FCS 检验。

6.3.2 CRC 计算

在 IEEE802.15.4 网络中使用的 CRC 多项式定义为

$$G_{16}(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$$

通过以下算法计算发送使用的 FCS:

$$M(x) = b_0x^{k-1} + b_1x^{k-2} + \dots + b_{k-2}x + b_{k-1}$$

多项式代表要计算的校验和位的时序。M(x)乘以 x^{16} , 得出多项式:

$$N(x) = M(x) \cdot x^{16}$$

用 N(x) 数模 2 除以发生器多项式, $G_{16}(x)$, 得出余数多项式,

$$R(x) = r_0x^{15} + r_1x^{14} + \dots + r_{14}x + r_{15}$$

FCS 字段由余数多项式, R(x) 的系数设定。

例如:

假设一个 5-octet 的 ACK 帧的 MHR 字段为:

0100 0000 0000 0000 0101 0110.

在时序上先发送最左边位 (b_0). FCS 应为

0010 0111 1001 1110.

在时序上先发送最左边位 (r_0).

6.3.3 自动 FCS 生成

通过设置寄存器为 TX_AUTO_CRC_ON=1 计划自动 FCS 生成。这样, AT86RF212 就可以自动进行 FCS 自动。FCS 会计算设定帧长度为 N ($3 \leq N \leq 127$) 的帧在帧缓冲中的前 N-2 octet, 并发送 FCS octet 代替帧缓冲的最后 2 octet。

6.3.4 自动 FCS 校验

可在基本和扩展操作模式中对接收帧使用自动 FCS 检验。若接收帧的 FCS 有效, 则寄存器 RX_CRC_VALID 位 (寄存器 0x06, PHY_RSSI) 设置为 1。此外, RX_STATUS 的第 7 位字节也做相应设置, 参看第 4.3.2 小节。

在扩展操作模式中, 如果相应的 FCS 无效, RX_AACK 程序不接受任何帧, 也不发出 TRX_END 中断请求。在 TX_ARET 模式的操作中, 会对接收应答的 FCS 进行自动校验。如果校验不正确, 则不接受应答, 有关自动重试的内容请参看 5.2.4 小节。

6.3.5 寄存器说明

寄存器 0x04 (TRX_CTRL_1):

TRX_CTRL_1 寄存器为控制不同操作模式和无线电收发器设置的多功能寄存器, 见表 6-22。

表 6-22 寄存器 0x04 (TRX_CTRL_1)

位	7	6	5	4
名称	PA_EXT_EN	IRQ_2_EXT_EN	TX_AUTO_CRC_ON	RX_BL_CTRL
读取 / 写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	1	0
位	3	2	1	0
名称	SPI_CMD_MODE	SPI_CMD_MODE	IRQ_MASK_MODE	IRQ_POLARITY
读取 / 写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0

- **第 7 位-PA_EXT_EN**

参看 9.4.3 小节。

- **第 6 位-IRQ_2_EXT_EN**

参看 9.5.2 小节。

- **第 5 位-TX_AUTO_CRC_ON**

当寄存器位 TX_AUTO_CRC_ON=1 时（即，默认值），将执行 FCS 自动生成。

- **第 4 位-RX_BL_CTRL**

参看 9.6.2 小节。

- **第 3: 2 位-SPI_CMD_MODE**

参看 4.4.1 小节。

- **第 1 位-IRQ_MASK_MODE**

参看 4.7.2 小节。

- **第 0 位-IRQ_POLARITY**

参看 4.7.2 小节。

寄存器 0x06 (PHY_RSSI):

PHY_RSSI 寄存器为用于指示 FCS 有效性，提供随机数和 RSSI 值的多功能寄存器。

表 6-23 寄存器 0x06 (PHY_RSSI)

位	7	6	5	4
名称	RX_CRC_VALID	RND_VALUE	RND_VALUE	RSSI[4]
读取/写入	R	R	R	R
复位值	0	0	0	0
位	3	2	1	0
名称	RSSI[3]	RSSI[2]	RSSI[1]	RSSI[0]
读取/写入	R	R	R	R
复位值	0	0	0	0

• **第 7 位-RX_CRC_VALID**

此寄存器位读取指示的是最后接收的帧是否带有有效 FCS。在更新寄存器位的同时发出 IRQ_3(TRX_END)，并一直保持有效直至发现下一个 SHR，值“1”对应的是有效的 FCS，值“0”对应的是无效 FCS。

• **6: 5 位-RND_VALUE**

参看 9.1.8 小节中的寄存器说明。

• **4: 0 位-RSSI**

参看 6.4.4 小节中的寄存器说明。

6.4 接收信号强度指示器 (RSSI)

接收信号强度指示器特性为：

- 动态范围：81dB
- RSSI 最小值为 0
- RSSI 最大值为 28

6.4.1 概览

RSSI 为用于指示所选信道中接收信号强度的 5 位值，步长为 3dB。不是为了将 IEEE802.15.4 标准信号与其他信号区分开，而是只对接收信号强度进行评估。RSSI 为 ED 测量提供了基准，见 6.5。

6.4.2 读取 RSSI

在基本操作模式中，任何接收状态中的 RSSI 值均为有效，并按照表 6-24 规定的时间间隔进行更新。可通过读取寄存器 0x06 (PHY_RSSI) 的 RSSI 位访问当前 RSSI 值。

表 6-24 RSSI 更新间隔

PHY 模式	更新间隔[μs]
BPSK-20	32
BPSK-40	24
O-QPSK	8

不建议在使用扩展操作模式时读取 RSSI 值，而是应使用自动生成的 ED 值，见 6.5 小节。

6.4.3 数据解释

RSSI 值是一个 5 位值，用于指示接收器的输入功率，步长为 3dB，范围是 0-28。

RSSI 值为 0 表示接收器输入功率小于 RSSI_BASE_VAL[dBm]。RSSI_BASE_VAL 值自身取决于 PHY 模式，参看 7.1 小节。标准条件见于表 6-25。

由于环境条件（温度、电压、半导体参数，等等），RSSI_BASE_VAL 的公差最大值为 ±5dB。可将此视为测量范围的恒定偏差。

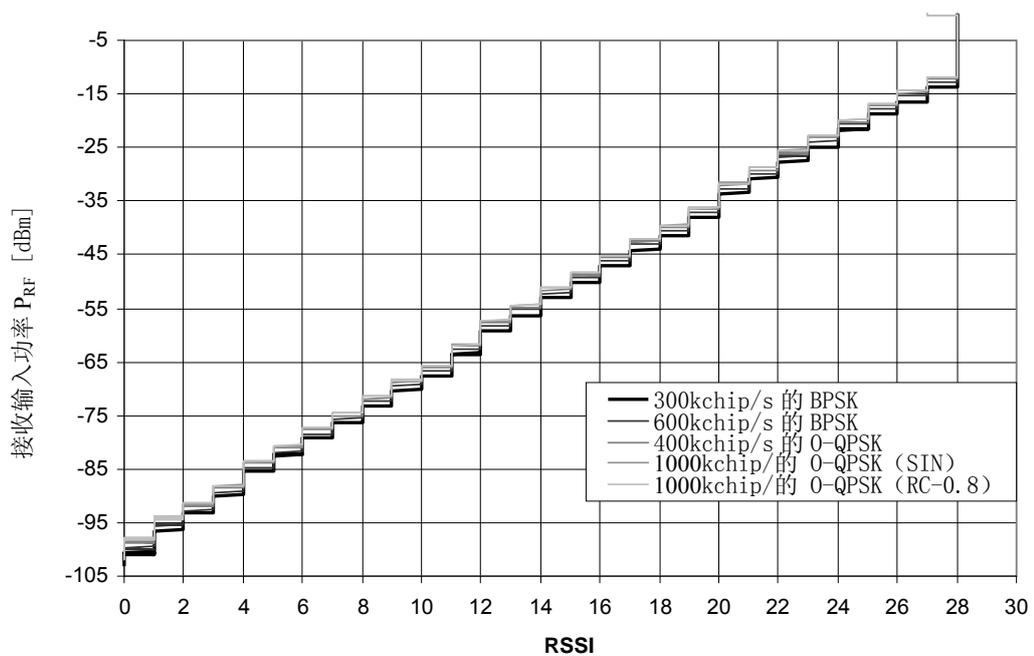
表 6-25 RSSI_BASE_VAL

PHY 模式	RSSI_BASE_VAL[dBm]	最大公差[dB]
码片速率为 300kchip/s 的二相相移键控 (BPSK)	-100	±5
码片速率为 600kchip/s 的二相相移键控 (BPSK)	-99	±5
码片速率为 400kchip/s 的偏移四相移相键控 (O-QPSK)	-98	±5
码片速率为 1000kchip/s 的正弦形 (SIN) 偏移四相移相键控 (O-QPSK)	-97	±5
1000kchip/s 的上升余弦形 (RC-0.8) 偏移四相移相键控 (O-QPSK)	-97	±5

当 RSSI 值在 1 至 28 范围内时，可按照以下公式计算接收器输入功率：

$$P_{RF} = \text{RSSI_BASE_VAL}[\text{dBm}] + 3(\text{RSSI} - 1) [\text{dBm}]$$

图 6-3 RSSI 值与接收器输入功率关系图



6.4.4 寄存器说明

寄存器 0x06(PHY_RSSI)

表 6-26 寄存器 0x06 (PHY_RSSI)

位	7	6	5	4
名称	RX_CRC_VALID	RND_VALUE	RND_VALUE	RSSI
读取/写入	R	R	R	R
复位值	0	0	0	0

位	3	2	1	0
名称	RSSI	RSSI	RSSI	RSSI
读取/写入	R	R	R	R
复位值	0	0	0	0

• **第 7 位—RX_CRC_VALID**

参看 6.3.5 小节中的寄存器说明。

• **6: 5 位—RND_VALUE**

参看 9.1.8 小节中的寄存器说明。

• **4: 0 为—RSSI**

自动 RSSI 测量结果存储在寄存器的 RSSI 位。在任何接收状态中，均会按照表 6-24 所述的时间间隔更新该值。

在 0 至 28 之间的值，指示的是由分辨率为 3dB 的输入功率 (dBm) 对数曲线表示的接收信号强度。RSSI 值为 0 表示接收器输入功率小于 RSSI_BASE_VAL[dBm] (见表 6-25)，28 则表示输入功率等于或大于 (RSSI_BASE_VAL+81) [dBm]。

6.5 能量检测 (ED)

能量检测 (ED) 模块的特性为:

- 已设定的 85 个唯一能量电平
- 1dB 的分辨率

6.5.1 概览

接收器 ED 测量 (ED 检测程序) 可用作信道选择算法的一部分。在 IEEE802.15.4 标准信道的带宽内预计接收信号功率，而不是用于识别信道中的解码信号。由 8 个符号周期的 RSSI 平均值计算 ED 值，但高数据传输速率模式除外，参看 7.1.4 小节。

6.5.2 测量说明

可通过两种方式开始 ED 测量:

- 手动，在寄存器 0x07(PHY_ED_LEVEL)写入任意值，或
- 自动，在检测到输入帧的有效 SHR 之后。

无线电收发器的手动开始 ED 测量须在 RX_ON 或 BUSY_RX 状态中执行。在 ED 测量时间的最后 (8 符号周期) 由中断请求 IRQ_4 (CCA_ED_DONE) 指示结束，并将测量结果存储在寄存器 0x07(PHY_ED_LEVEL)中。

为了避免干扰自动开始的 ED 测量，可提供设置寄存器 RX_PDT_DIS 位 (寄存器 0x15, RX_SYN) 取消 SHR 检测，参看 7.2 小节。

请注意不建议在使用扩展操作模式时，手动开始 ED 测量。

在 SHR 检测之后，开始自动 ED 测量。自动测量结束无中断信号指示。

当使用基本操作模式时，IRQ_2 (RX_START) 之后的 8 个符号周期加 12 μs 处理时间以内可访问当前接收帧的有效 ED 值（寄存器 0x07，PHY_ED_LEVEL）并保持有效直至下一个输入帧生成新的 RX_START 中断请求或开始其他 ED 测量。ED 值保持有效直至下一个输入帧生成 RX_START 中断或其他 ED 测量开始。

当使用扩展操作模式时，建议屏蔽 IRQ_2 (RX_START)，因此不能将中断作为时序参照。中断 IRQ_3 (TRX_END) 发出成功帧接收信号。在此情况下，须在下一个 SHR 检测的时间范围加 ED 测量时间内读取该值，以避免覆盖当前 ED 值。

寄存器 0x07 (PHY_ED_LEVEL) 值为：

表 6-27 寄存器 PHY_ED_LEVEL 位解释

PHY_ED_LEVEL	说明
0xFF	复位值
0x00... 0x54	最后 ED 测量的结果

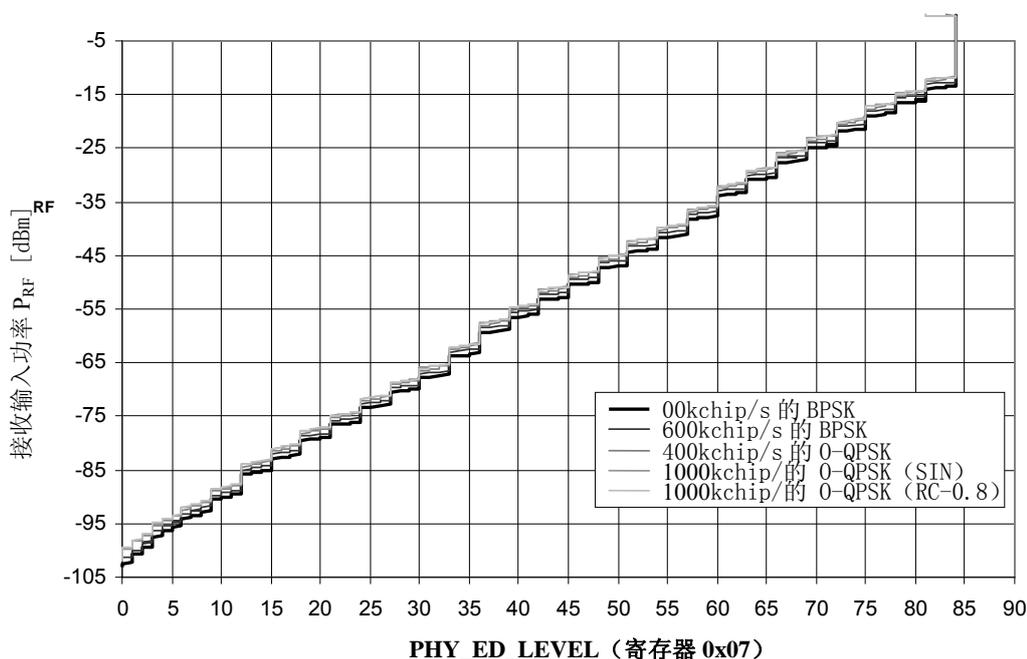
6.5.3 数据解释

PHY_ED_LEVEL 是一个 8 位的寄存器。AT86RF212 的 ED 值有效范围为 0x00 至 0x54 (0 至 84)，分辨率为 1dB。0x55 至 0xFE 的值不会发生，值 0xFF 表示复位值。PHY_ED_LEVEL=0 的值表示测得的接收器输入功率小于或等于 RSSI_BASE_VAL[dBm](参看表 6-25)。

在 0 至 84 范围以内的 ED 值的接收器输入功率计算方法如下：

$$P_{RF} = \text{RSSI_BASE_VAL}[\text{dBm}] + \text{ED}[\text{dBm}]$$

图 6-4 接收器输入管理与 ED 值关系图



6.5.4 中断处理

在手动开始的 ED 测量结束时发送中断请求 IRQ_4(CCA_ED_DONE)。

请注意只能在 RX 状态中，而不是在 RX_ACK 状态中开始 ED 测量。反之，无线电收发器会在未曾实际执行 ED 测量的情况下生成 IRQ_4(CCA_ED_DONE)。

6.5.5 寄存器说明

寄存器 0x07 (PHY_ED_LEVEL)

PHY_ED_LEVEL 寄存器含有 ED 测量结果。

表 6-28 寄存器 0x07 (PHY_ED_LEVEL)

位	7	6	5	4	3	2	1	0
名称	ED_LEVEL[7:0]							
读取/写入	R ⁽¹⁾							
复位值	1	1	1	1	1	1	1	1

附注：1. 须通过写入访问开始手动 ED 测量。

7: 0 位-ED_LEVEL

ED 最小值(ED_LEVEL=0)表示接收器输入功率小于或等于 RSSI_BASE_VAL[dBm]。范围在 84dB 以内,分辨率为 1dB,精确度绝对值为±5dB。

可通过对寄存器进行写入访问来开始手动 ED 测量。0xFF 的值表示测量尚未开始(复位值)。

测量持续时间为 8 个符号周期,见 7.1.3 小节。

高数据传输速率模式的自动测量持续时间缩短为 2 个符号周期，参看 7.1.4。在此类模式中手动开始的 ED 测量时，只要接收器处于 RX_ON 状态之中，测量时间仍为 8 个符号周期。

在 {0x00,...,0x54} 范围内的值指示最后 ED 测量的结果。

6.6 空闲信道评估 (CCA)

空闲信道评估 (CCA) 模块的主要特点为：

- 按照 IEEE802.15.4-2006 标准的定义，提供四个 CCA 模式
- 可调节能量检测算法阈值

6.6.1 概览

CCA 测量用于检测空闲信道。IEEE802.15.4-2006 标准定义四个 CCA 模式：

表 6-29 CCA 模式概览

CCA 模式	说明
1	<i>能量高于阈值</i> CCA 将在检测到高于 ED 阈值的能量时发送繁忙介质报告。
2	<i>仅载波侦听</i> CCA 只在检测到有调制并显示出 IEEE802.15.4 标准的合规信号特点的信号之后，发送繁忙介质报告。信号强度可能高于或低于 ED 阈值。
0,3	<i>载波侦听及能量高于阈值</i> CCA 将通过下列逻辑组合发送繁忙介质报告 -检测到由调制且显示出标准特性的信号时，和/或 -能量高于 ED 阈值。 可将逻辑算子配置为或（模式 0）或与（模式 3）。

6.6.2 配置与请求

可通过寄存器 0x08 (PHY_CC_CCA) 配置 CCA 模式。

在基本操作模式中，可通过在 AT86RF212 的任何 RX 状态中设置 CCA_REQUEST=1 (寄存器 0x08, PHY_CC_CCA)，手动开始 CCA 请求。可通过寄存器 0x01 (TRX_STATUS) 访问当前信道状态 (CCA_STATUS) 和 CCA 完成状态 (CCA_DONE)。

中断命令 IRQ_4 (CCA_ED_DONE) 指示手动开始的 CCA 结束 (8 个符号周期加 12 μs 的处理延时)。

寄存器 0x09 (CCA_THRES) 的子寄存器 CCA_ED_THRES 定义“能量高于阈值”算法的接收功率阈值。阈值计算公式如下：

$$V_THRES = (RSSI_BASE_VAL + 2 \cdot CCA_ED_THRES) [dBm]$$

任何在此电平以上的接收功率均被解释为繁忙信道。

请注意不建议在使用扩展操作模式时，手动开始 CCA 请求。

6.6.3 数据解释

可提供寄存器 0x01 (TRX_STATUS) 访问当前信道状态 (CCA_STATUS) 和 CCA 完成状态 (CCA_DONE)。请注意寄存器 CCA_DONE 位和 CCA_STATUS 位在响应 CCA_REQUEST 时清空。

CCA_DONE=1 指示测量时间完成。若无线电收发器在 CCA 评估周期中未检测到任何信号 (空闲信道)，CCA_STATUS 位被设置为 1,反之，则设置为 0。

当使用“能量高于阈值”算法时，高于 V_THRES 电平的接收功率被解释为繁忙信道。

当使用“载波侦听”算法时 (即，CCA_MODE=0, 2 和 3) 时，AT86RF212 将在检测到高于 RSSI_BASE_VAL(见表 6-25)的 IEEE802.15.4 标准信号 (PHY 模式指定信号) 之后，发送繁忙信道报告。AT86RF212 也能检测到此值以下的信号，但随着信号功率的下降，被检测到的可能性也在下降，在无线电收发器的敏感电平上几乎为零 (见第 0 章)。

6.6.4 中断处理

在手动开始的 CCA 测量结束时，发出中断 IRQ_4 (CCA_ED_DONE)。

附注

•只能在基本操作模式的 RX 状态中开始 CCA 请求。否则，无线电收发器将生成 IRQ_4 (CCA_ED_DONE)并在未曾执行 CCA 测量的情况下，将寄存器 CCA_DONE 设置为=1。

6.6.5 测量时间

手动开始的 CCA 测量响应时间取决于接收器状态。

在 RX_ON 状态中，在八个符号周期内执行 CCA 测量，并在 IRQ_4(CCA_ED_DONE)事件后或 CCA_DONE=1 (寄存器 0x01, TRX_STATUS) 时，可以读取结果。

在 BUSY_RX 状态中，CCA 测量持续时间取决于 CCA 模式和与 SHR 检测相关的 CCA 请求。IRQ_4(CCA_ED_DONE)指示 CCA 测量完成。BUSY_RX 状态下的 CCA 测量周期变化见于表 6-30。

表 6-30 CCA 测量周期与 BUSY_RX 状态下的访问

CCA 模式	ED 测量中的请求 ⁽¹⁾	ED 测量后的请求
1	能量高于阈值。	
	在自动 ED 测量周期结束后可访问 CCA 结果。	请求后即可访问 CCA 结果。
2	仅载波侦听。	
	请求后即可范围 CCA 结果	
3	载波侦听及能量高于阈值 (与)。	
	在自动 ED 测量周期结束后可访问 CCA 结果。	请求后即可访问 CCA 结果。
0	载波侦听及能量高于阈值 (或)。	
	在自动 ED 测量周期结束后可访问 CCA 结果。	请求后即可访问 CCA 结果。

附注：1.在检测到 SHR 之后，将在 8 个符号周期内开始自动 ED 测量(高数据传输速率 PHY 模式为 2 个符号周期)，参看 7.1.3。必须完成此自动 ED 测量以便为 CCA 测量提供结果。每个帧只执行一次自动 ED 测量。

建议只在 RX_ON 状态中执行 CCA 测量。为了避免意外切换至 BUSY_RX 状态，看通过设置寄存器 RX_PDT_DIS(寄存器 0x15, RX_SYN)位，取消 SHR 检测，参看 7.2 小节。接收器一直处于 RX_ON 状态以便执行 CCA 测量，直至寄存器 RX_PDT_DIS 位被设置回到继续帧接收。在此情况下，CCA 测量持续时间为 8 个符号周期。

6.6.6 寄存器说明

寄存器 0x01(TRX_STATUS):

寄存器 0x01(TRX_STATUS)的两个寄存器位指示了 CCA 测量的状态。

表 6-31. 寄存器 0x01(TRX_STATUS)

位	7	6	5	4
名称	CCA_DONE	CCA_STATUS	预留	TRX_STATUS
读取/写入	R	R	R	R
复位值	0	0	0	0
位	3	2	1	0
名称	TRX_STATUS	TRX_STATUS	TRX_STATUS	TRX_STATUS
读取/写入	R	R	R	R
复位值	0	0	0	0

• 第 7 位-CCA_DONE

此寄存器指示 CCA 测量完成，此外，中断请求 IRQ_4(CCA_ED_DONE)也会指示 CCA 测量完成。请注意寄存器 CCA_DONE 位在响应 CCA_REQUEST 时被清空。

表 6-32. CCA 算法状态

寄存器位	值	说明
CCA_DONE	0	CCA 计算未完成
	1	CCA 计算已完成

• 第 6 位-CCA_STATUS

在完成 CCA 请求之后，可在寄存器 CCA_STATUS 位读取 CCA 测量结果。请注意寄存器 CCA_STATUS 位在响应 CCA_REQUEST 时被清空。

表 6-33. CCA 状态结果

寄存器位	值	说明
CCA_STATUS	0	指示信道繁忙
	1	指示信道空闲

- 第 5 位-预留
- 4: 0 位-TRX_STATUS

参看 5.1.5 和 5.2.6 小节。

寄存器 0x08 (PHY_CC_CCA):

此寄存器用于开始和控制 CCA 测量。

表 6-34 寄存器 0x08 (PHY_CC_CCA)

位	7	6	5	4
名称	CCA_REQUEST	CCA_MODE	CCA_MODE	CHANNEL
读取/写入	W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	1	0
位	3	2	1	0
名称	CHANNEL	CHANNEL	CHANNEL	CHANNEL
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	1	0	1

• 第 7 位-CCA_REQUEST

通过 CCA_REQUEST=1 的设置手动开始 CCA 测量。在通过 CCA_REQUEST=1 请求 CCA 测量后自动清空该寄存器位。

• 6: 5 位-CCA_MODE

可使用寄存器 CCA_MODE 位选择 CCA 模式。

表 6-35.CCA 模式

寄存器位	值	说明
CCA_MODE	0	载波侦听或能量高于阈值
	1	能量高于阈值
	2	仅载波侦听
	3	载波侦听与能量高于阈值

请注意 IEEE802.15.4-2006 标准的 CCA 模式 3 使用逻辑算子与/或将 CCA 模式 1 和 2 进行逻辑组合。可选择:

- CCA_MODE=0 用于逻辑运算或, 及
- CCA_MODE=3 用于逻辑运算与。

• 4: 0 位-CHANNEL

参看 7.8 小节。

寄存器 0x09 (CCA_THRES):

此寄存器设置 CCA 的 ED 阈值水平。

表 6-36.寄存器 0x09 (CCA_THRES)

位	7	6	5	4
名称	预留	预留	预留	预留
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	1	1	1
位	3	2	1	0
名称	CCA_ED_THRES	CCA_ED_THRES	CCA_ED_THRES	CCA_ED_THRES
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	1	1	1

- 7: 5 位-预留
- 4: 0 位-CCA_ED_THRES

CCA 模式 1 请求在测量的接收功率高于 $(RSSI_BASE_VAL+2 \cdot CCA_ED_THRES)$ [dBm] 时指示繁忙信道。CCA 模式 0 和 3 与此结果逻辑相关。

6.7 说前先听 (LBT)

6.7.1 概览

使用 AT86RF212 的设备符合已制定的各项规则。按照欧洲规则，IEEE802.15.4 标准规定的基于 CSMA-CA 的发送并不适用。原则上，发送受限于低占空比 (0.1 至 1%)。但是，按照[4]的规定，应用说前先听(LBT)和自适应频率捷变 (AFA) 的设备无须符合占空条件。

因此，LBT 在降低网络延迟方面可能很有帮助。

最短收听时间

LBT 设备须符合最低收听时间的要求，请参看[4]的 9.1.1.2 小节。如果发送不要求应答，那么在发送之前，设备必须收听一个等于或大于 LBT 阈值电平接收信号，以便判定目标信道是否可用。

使用 LBT 的设备须收听 5ms 的固定周期。如果在此周期之后，信道阈值，可立即开始发送 (即，无须 CSMA)。反之，新收听周期则须在随机选择的 5 到 10ms 的时间范围内。时间分辨率约为 0.5ms。应重复最后一步，直至空闲信道可用。

LBT 阈值

依照[4]的规定，若信道间隔为 1MHz,那么 IEEE 802.15.4 标准信号的 LBT 最大阈值约为-82dBm。

6.7.2 LBT 模式

当在扩展操作模式中操作时，AT86RF212 支持上述 LBT 规定的收听模式。

特别是在 TX_aret 状态下（见 5.2.4 小节），当设置寄存器 CSMA_LBT_MODE 位（寄存器 0x17，XAH_CTRL_1）时，LBT 收听模式可代替 CSMA-CA 算法。但是，在此情况下，寄存器 MAX_CSMA_RETRIES 位（寄存器 0x2C，XAH_CTRL_0）和 MIN_BE 及 MAX_BE 位（寄存器 0x2F，CSMA_BE）被忽略，这意味着将一直维持收听模式直至发现空闲信道或 TX_aret 处理被取消。可通过将 TRX_CMD 设置为 FORCE_PLL_ON 或 FORCE_TRX_OFF（寄存器 0x02，TRX_STATE）实现后者。TX_aret 的其他各个方面均保持不变；参看 5.2.4 小节。

可按照 CCA 阈值配置的不同方法，配置 LBT 阈值，即，设置寄存器 CCA_MODE 位（寄存器 0x08，PHY_CC_CCA）和寄存器 CCA_ED_THRES 位（寄存器 0x09，CCA_THRES），参看 6.6 小节。

6.7.3 寄存器说明

寄存器（0x08，PHY_CC_CCA）：

当使用 LBT 时，此寄存器与测量模式相关，即，选择能量高于阈值，或是载波侦听（CS）还是二者结合。

表 6-37. 寄存器 0x08 (PHY_CC_CCA)

位	7	6	5	4
名称	CCA_REQUEST	CCA_MODE	CCA_MODE	CHANNEL
读取/写入	W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	1	0
位	3	2	1	0
名称	CHANNEL	CHANNEL	CHANNEL	CHANNEL
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	1	0	1

• 第 7 位-CCA_REQUEST

不适用于 LBT，见 6.6.6 小节。

• 6: 5 位-CCA_MODE

可通过寄存器 CCA_MODE 位，使用 CCA 模式选择适当的 LBT 测量模式，参看 6.6 小节。

• 4: 0 位-CHANNEL

参看 7.8 小节。

寄存器 0x09（CCA_THRES）：

在使用 LBT 时，此寄存器与 ED 阈值对应。

表 6-38. 寄存器 0x09 (CCA_THRES)

位	7	6	5	4
名称	预留	预留	预留	预留
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	1	1	1
位	3	2	1	0
名称	CCA_ED_THRES	CCA_ED_THRES	CCA_ED_THRES	CCA_ED_THRES
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	1	1	1

• 7: 5 位-预留

• 4: 0 位-CCA_ED_THRES

若 CCA_MODE=1, 那么当测量的接收频率高于 (RSSI_BASE_VAL+2 • CCA_ED_THRES) [dBm] 时, 表示信道繁忙。CCA_MODE=0 和 3 与此结果逻辑相关。

寄存器 0x17 (XAH_CTRL_1) :

此寄存器对应 LBT 模式的启用或禁用。

表 6-39. 寄存器 0x17 (XAH_CTRL_1)

位	7	6	5	4
名称	预留	CSMA_LBT_MODE	AACK_FLTR_RES_FT	AACK_UPLD_RES_FT
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0
位	3	2	1	0
名称	预留	AACK_ACK_TIME	AACK_PROM_MODE	预留
读取/写入	R	R/W	R/W	R
复位值	0	0	0	0

• 第 7 位-预留

• 第 6 位-CSMA_LBT_MODE

若设置为 0 (默认), 则在 TX_ARET 状态下, 将 CSMA_CA 算法用于空闲信道评估。反之, 则应用 LBT 指定收听模式。

• 第 5 位-AACK_FLTR_RES_FT

参看 5.2.6 小节。

• 第 4 位-AACK_UPLD_RES_FT

参看 5.2.6 小节。

• 第 3 位-预留

• 第 2 位-AACK_ACK_TIME

参看 5.2.6 小节。

- 第 1 位-AACK_PROM_MODE

参看 5.2.6 小节。

- 第 0 位-预留

6.8 链路质量显示 (LQI)

6.8.1 要求

IEEE802.15.4 标准将 LQI 定义为接收帧的强度和/或质量特性表征。此标准未设定网络或应用层的 LQI 结果使用。LQI 值应为 0 到 255 范围内的一个整数，至少有 8 个唯一值。LQI 的最小值和最大值 (0 和 255) 应分比与最低和最高质量的合规信号对应，而其间的 LQI 值应在两个阈值间均匀分配。

6.8.2 执行

在帧接收的信号检测过程中，AT86RF212 使用多个符号的关联性结果以便计算 LQI 值的预计值。关联性结果的平均值与检测错误概率成反比为这种处理提供了依据。

在检测到 SHR 之后，对每个接收帧自动执行 LQI 计算。按照 IEEE802.15.4 标准的规定，LQI 值为 0 至 255 之间的一个整数。

6.8.3 获取 LQI 值

一旦完成相应的帧接收，即可读取 LQI 值。IRQ_3 (TRX_END) 指示可读取 LQI。只能通过读取访问帧缓冲平均值获得此值，见 4.3.2 小节。

6.8.4 备注：

第 LQI 值的原因可能来自两个方面：低信号强度和/或严重信号失真，如，干扰和/或多径传播。但是，高 LQI 值表明充分的信号强度和低信号失真。

请注意 LQI 值几乎在所有低信号失真和信号强度大大高于敏感电平的情景下均为 255。在此情况下，数据包误差率趋近于零，且信号强度提高，也就是说，不能进一步通过提高发送功率降低误差率。接收信号强度显示 (RSSI) 或能量检测 (ED) 可用于评估信号强度和链路极限。

ZigBee 网络通常要求识别两个节点间的“最佳”路径。可依据最优化标准，应用 LQI 和 RSSI/ED。如果以低帧误差率（对应高流通量）为最优化标准，那么应考虑 LQI 值。但是，如果目标是降低发送功率，那么 RSSI/ED 值也会有帮助。

不同的 LQI 和 RSSI/ED 组合可适用于多种路径设定。按照拇指规则，RSSI/ED 上的信息可用于按照高 LQI 值区分不同的链路。但是，在确定路径时，即使链路的 RSSI/ED 值较高，但如果 LQI 值较低，也应排除此发送链路，这是由于 RSSI/ED 值仅能说明接收信号的强度，但信号源可能是一个干扰源。

7. 模块说明

7.1 物理层模式

7.1.1 扩频，调制与频谱整形

AT86RF212 支持多种物理层 (PHY) 模式，与 RF 信道选择无关。符号映射及码片扩频，调制和频谱整形是数字基带处理器的一个部分，见图 7-1。

图 7-1 基带发送器结构



扩频，调制和频谱整形的结合仅限于表 7-1 中列出的几种组合。

AT86RF212 完全符合 IEEE802.15.4 标准的 20kbit/s 和 40kbit/s 低数据传输速率模式，采用二相相移键控 (BPSK)，分别按照 300kchip/s 或 600 kchip/s 的固定码片速率进行扩频。符号率分别为 20ksymbol/s 或 40 ksymbol/s。在两种情况下，频谱整形均近似于滚降系数为 1.0 (RC-1.0) 的升余弦滤波器。

按照 IEEE802.15.4-2006 的规定的备选数据传输速率，AT86RF212 支持偏移四相移相键控 (O-QPSK)，固定码片速率为 400kchip/s 或 1000kchip/s。

当码片速率为 400kchip/s 时，按照 IEEE802.15.4-2006 标准对 868.3MHZ 频段的规定。频谱整形常为半正弦整形 (SIN) 和滚降系数为 0.2 升余弦滤波 (RC-0.2) 的组合。当码片速率为 1000 kchip/s 时，频谱正弦为半正弦滤波 (SIN) (如 IEEE802.15.4-2006 [1]标准规定) 或滚降系数为 0.8 的升余弦滤波 (RC-0.8) (如 IEEE P802.15.4c[3]标准规定)。

对于偏移四相移相键控 (O-QPSK)，AT86RF212 支持符合 IEEE802.15.4-2006 标准的扩频，数据传输速率为 100 kbit/s 或 250kbit/s，依码片速率而定，其相应的符号率分别为 25ksymbol/s 或 62.5ksymbol/s。

此外，AT86RF212 还支持短码长度 O-QPSK 的另外两种扩频码，这样，可在 200，400，500 和 1000kbit/s 帧的 PSDU 部分产生更高的非 IEEE802.15.4-2006 标准数据传输速率。有关特有的高数据传输速率模式的详细信息见于 7.1.4 小节。

表 7-1. 调制与频谱整形

调制	码片率 [kchip/s]	支持的 PPDU 标头数据传输速率 [kbit/s]	支持的 PSDU 数据传输速率 [kbit/s]	频谱整形
BPSK	300	20	20	RC-1.0
	600	40	40	RC-1.0
O-QPSK	400	100	100/200/400	SIN 加 RC-0.2
	1000	250	250/500/1000	SIN 或 RC-0.8

7.1.2 配置

可通过设置寄存器 0x0C(TRX_CTRL_2)的适当寄存器位选择 PHY 模式，参看 7.1.5 小节。在配置过程中，收发器须处于 TRX_OFF 状态中。

7.1.3 符号周期

在 IEEE802.15.4 标准及其相应文件中，设定的时间参照通常以符号周期为单位，因此，PHY 模式须做单独说明。表 7-2 为符号周期持续时间。请注意独有的高数据传输速率模式的符号周期（定义）与相应的基础模式符号周期相同。

表 7-2 符号周期持续时间

调制	PSDU 数据传输速率[kbit/s]	符号周期持续时间[μ s]
BPSK	20	50
	40	25
O-QPSK	100,200,400	40
	250,500,1000	16

7.1.4 独有的高数据传输速率模式

主要特点有：

- 高数据传输速率可达 1000 kbit/s
- 基本操作模式和扩展操作模式均可支持

7.1.4.1 概览

AT86RF212 支持不以 IEEE802.15.4 合规网络为目标的应用中 {200, 400, 500, 1000}kbit/s 的其他数据传输速率。

高数据传输速率模式与 IEEE802.15.4-2006 sub-1 GHz O-QPSK 模式使用相同的 RF 信道带宽。可提供改变 O-QPSK 的扩频码，缩短码长度，实现更高的数据传输速率。可以 2 或 4 为系数缩短长度。

这样，可将 400kchip/s 码片长度的 O-QPSK 的数据传输速率分别提高到 200kbit/s(2 倍)和 400kbit/s (4 倍)。

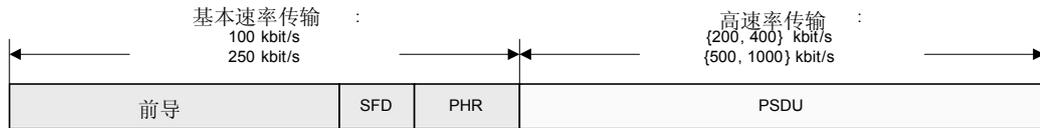
将 1000kchip/s 码片长度的 O-QPSK 的数据传输速率分别提高到 500kbit/s (2 倍)和 1000kbit/s (4 倍)。

由于扩频系数降低，接收灵敏度降低。10.7 小节的 10.7.1 参数列出了不同数据传输速率对应的灵敏度标准值。请注意提供的高数据传输速率模式的灵敏度值是长度最大值为 127octet 的 PSDU 对应值。

7.1.4.2 高数据传输速率帧结构

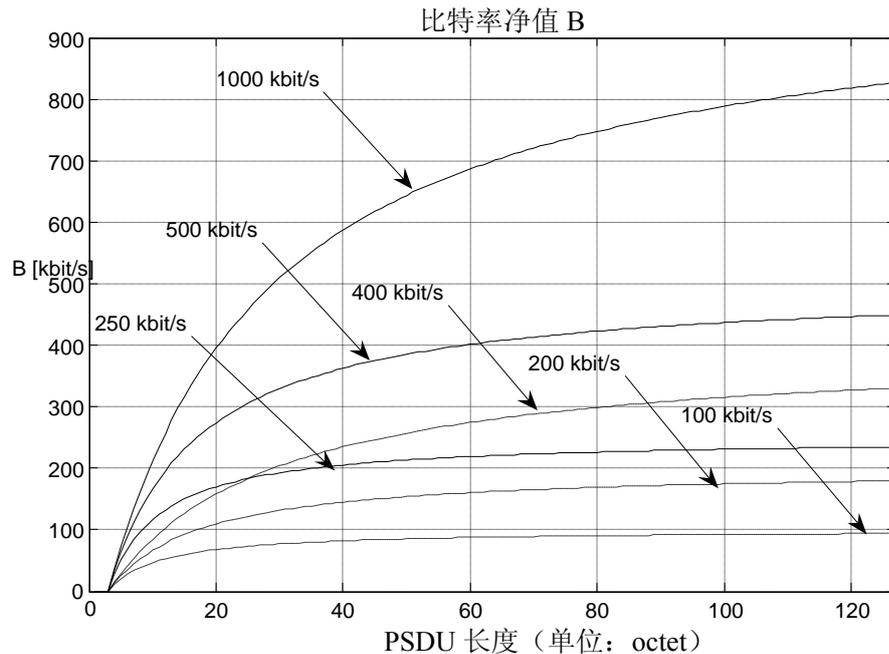
为了实现稳定的帧同步，高数据传输速率调制仅限于 PSDU 部分。PPDU 标头（前导，SFD 和 PHR 字段）以符合 IEEE802.15.4 标准的 O-QPSK 下 100kbit/s 或 250kbit/s 的速率（基本速率）传输，见图 7-2。

图 7-2 高数据传输速率帧结构



由于 PPDU 标头和 FCS 造成的负荷,有效数据传输速率会低于所选数据传输速率,这取决于 PSDU 的长度。图 7-3 列出了有效数据传输速率的示意图。

图 7-3 O-QPSK 模式的有效数据传输速率



因此, 高速率传输因其较高的有效数据传输速率被用于大 PSDU 长度的传输, 以便降低系统功耗。

7.1.4.3 高数据传输速率模式选项

缩短应答时间

如果设置了寄存器 AACK_ACK_TIME 位 (寄存器 0x17, XAH_CTRL_1), 那么 200 和 400 kbit/s 速率的应答时间将被缩短至 2 个符号周期, 500 和 1000 kbit/s 速率的应答时间则被缩短至 3 个应答周期, 参看表 5-24。反之, 按照 IEEE802.15.4 标准的规定, 应为 12 个符号周期。

接收器灵敏度控制

PPDU 标头 (SHR 和 PHR) 与 PHY 有效载荷 (PSDU) 之间不同的数据传输速率造成了标头和有效载荷间不同灵敏度。可通过设定接收器灵敏度极限电平对此进行调节。AT86RF212 在灵敏度极限电平设置中不保持帧与限制以下的 RSSI 电平同步。有关寄存器 0x15 (RX_SYN) 的灵敏度阈值配置方法, 请参看 7.2.3 小节。

扰码器

默认为 1000kbit/s 和 400kbit/s 使用附加码片扰码，以便减少数据对频谱特性的依赖。可通过将 OQPSK_SCRAM_EN 位（寄存器 0x0C, TRX_CTRL_2）设置为 0, 取消扰码。

能量检测

按照 IEEE802.15.4 标准的规定，ED 测量时间范围为 8 个符号周期，见 7.1.3 小节。在高数据传输速率下操作的帧的 ED 测量周期被缩短为 2 个符号周期，其中包括缩短的帧持续时间。这意味着 200kbit/s 和 400kbit/s 的 ED 测量时间为 80 μs，500kbit/s 和 1000kbit/s 的测量时间为 32 μs。

载波侦听

IEEE802.15.4-2006 标准规定了空闲信道评估的多种方式，其中包括使用能量高于阈值或载波侦听（CS）算法或将二者组合。因为高数据传输速率模式的信号不符合 IEEE802.15.4-2006 标准，所以当 AT86RF212 在此类模式下运行时，不支持 CS 算法。但是，支持“能量高于阈值”算法。

链路质量显示（LQI）

高数据传输速率模式的链路质量值不含有效信息，应将其取消。

7.1.5 寄存器说明

寄存器 0x0C(TRX_CTRL_2):

寄存器 TRX_CTRL_2 控制 PHY 模式设置。请注意在配置过程中，收发器须处于 TRX_OFF 状态之中。

表 7-3 寄存器 0x0C(TRX_CTRL_2)

位	7	6	5	4
名称	RX_SAFE_MODE	TRX_OFF_AVDD_EN	OQPSK_SCRAM_EN	OQPSK_SUB1_RC_EN
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	1	0
位	3	2	1	0
名称	BPSK_OQPSK	SUB_MODE	OQPSK_DATA_RATE	QPSK_DATA_RATE
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	1	0	0

- 第 7 位-RX_SAFE_MODE

参看 9.7.2 小节。

- 第 6 位- TRX_OFF_AVDD_EN

参看 5.1.4.3 小节。

- 第 5 位- OQPSK_SCRAM_EN

若设置为 1（复位值），那么扰码器可用于 OQPSK_DATA_RATE=2 和 BPSK_OQPSK=1(O-QPSK 可用)。反之，则将扰码器禁用。

请注意，在接收过程中，AT86RF212 对此位进行内部评估，因此严格要求按照 OQPSK_SCRAM_EN 对不同收发器进行排列以便保证其互用性。

• **第 4 位- OQPSK_SUB1_RC_EN**

此位只与 SUB_MODE=1 和 BPSK_OQPSK=1 相关。

若设置为 0，则 O-QPSK 传输的频谱整形为半正弦滤波。

若设置为 1，则以 1000kchip/s 的 O-QPSK 传输的频谱整形为 RC-0.8 的余弦滤波。与半正弦滤波和旁瓣相比，可降低上升峰值至平均比率（~1dB）的成本。此模式尤其适用于中国 780MHz 频段。

请注意在接收过程中，AT86RF212 不对此位做内部评估，因此并未明确要求按照 OQPSK_SUB1_RC_EN 对不同的收发器进行排列以保证其互用性。这很可能也适用于任何 IEEE802.15.4-2006 的 915MHz 合规 O-QPSK 收发器，因为两种整形均满足 IEEE802.15.4-2006 标准的要求。

• **第 3 位- BPSK_OQPSK**

若设置为 0（复位值），则应用 BPSK 发送和接收。

若设置为 1，则应用 O-QPSK 发送和接收。

请注意，在接收过程中，AT86RF212 对此位进行内部评估，因此严格要求按照 BPSK_OQPSK 对不同收发器进行排列以便保证其互用性。

• **第 2 位- SUB_MODE**

若设置为 1（复位值），则 BPSK_OQPSK=1 的码片速率为 1000kchip/s, BPSK_OQPSK=0 的码片速率为 600kchip/s。分别可实现 {250, 500, 1000}kbit/s 的数据传输速率，或 40kbit/s。此模式特别适用于 915Mhz 频段。O-QPSK 发送的频谱整形可为半正弦整形或 RC-0.8 整形，依 OQPSK_SUB1_RC_EN 而定。

若设置为 0（复位值），则 BPSK_OQPSK=1 的码片速率为 400kchip/s, BPSK_OQPSK=0 的码片速率为 300kchip/s。分别可实现 {100, 200, 400}kbit/s 的数据传输速率，或 20kbit/s。此模式特别适用于 868.3 MHz 频段。O-QPSK 发送的频谱整形总为半正弦整形与 RC-0.2 整形的组合。

请注意，在接收过程中，AT86RF212 对此位进行内部评估，因此严格要求按照 SUB_MODE 对不同收发器进行排列以便保证其互用性。

• **1:0 位- OQPSK_DATA_RATE**

此寄存器位控制在帧的 PSDU 部分的 O-QPSK 数据传输速率，详见表 7-4。复位值为 OQPSK_DATA_RATE=0。

请注意，在接收过程中，AT86RF212 对此位进行内部评估，因此严格要求按照 OQPSK_DATA_RATE 对不同收发器进行排列以便保证其互用性。

表 7-4. PSDU 中的 O-QPSK 数据传输速率

寄存器位	值	O-QPSK 数据传输速率 [kbit/s]	
		SUB_MODE=0	SUB_MODE=1
OQPSK_DATA_RATE	0	100	250
	1	200	500
	2,3	400	1000

在表 7-5 中,总结了 AT86RF212 支持的所有 PHY 模式及其相应的寄存器 TRX_CTRL_2 各位设置。字符 ‘-’ 表示位录入与具体的 PHY 模式不相关。

表 7-5 寄存器 0x0C(TRX_CTRL_2)位排列

PHY 模式	寄存器 0x0C, 位								附注
	7	6	5	4	3	2	1	0	
BPSK-20	-	-	-	-	0	0	-	-	IEEE 802.15.4
BPSK-40	-	-	-	-	0	1	-	-	IEEE 802.15.4
OQPSK-SIN-RC-100	-	-	-	-	1	0	0	0	IEEE 802.15.4-2006
OQPSK-SIN-RC-200	-	-	-	-	1	0	0	1	特有
OQPSK-SIN-RC-400-SCR-ON	-	-	1	-	1	0	1	-	特有, 启用扰码器
OQPSK-SIN-RC-400-SCR-OFF	-	-	0	-	1	0	1	-	特有, 关闭扰码器
OQPSK-SIN-250	-	-	-	0	1	1	0	0	IEEE 802.15.4-2006
OQPSK-SIN-500	-	-	-	0	1	1	0	1	特有
OQPSK-SIN-1000-SCR-ON	-	-	1	0	1	1	1	-	特有, 启用扰码器
OQPSK-SIN-1000-SCR-OFF	-	-	0	0	1	1	1	-	特有, 关闭扰码器
OQPSK-RC-250	-	-	-	1	1	1	0	0	IEEE P802.15.4c (中国)
OQPSK-RC-500	-	-	-	1	1	1	0	1	特有
OQPSK-RC-1000-SCR-ON	-	-	1	1	1	1	1	-	特有, 启用扰码器
OQPSK-RC-1000-SCR-OFF	-	-	0	1	1	1	1	-	特有, 关闭扰码器

附注: 1.并非严格符合 IEEE802.15.4-2006, 但大致相似, 可互用。

7.2 接收器 (RX)

7.2.1 概览

AT86RF212 收发器分为模拟无线电前端和数字域, 见图 1-1。

参照有关模拟接收器部分的章节, 可知 RF 差分信号经低噪声放大器 (LNA) 放大, 并由多相滤波器 (PPF) 分为正交信号。两条混合器电路将正交信号降低至媒介频率。集成带通滤波器 (BPF) 实现信道灵敏度。后面的模拟-数字转换器 (ADC) 对接收信号进行抽样并再生成数字 RSSI 信号, 见 6.4 小节。然后, 再由数字域的数字基带接收器 (RX BBP) 对 ADC 输出进行处理。

BBP 执行进一步的过滤和信号处理。接收器在 RX_ON 状态中搜索同步标头。在制定同步标头并发现 SFD 之后, 接收信号解调并传输至帧缓冲。

寄存器 TRX_STATUS 位（寄存器 0x01,TRX_STATUS）指示寄存器状态转换为 BUSY_RX。在整个帧接收完成后，接收器返回 RX_ON 以便收听信道。扩展操作模式应用的程序与此相似。

接收器设计用于处理±60ppm 以内的频率和符号率误差，参看 10.5 小节的参数 10.5.7。

在接收过程中，生成多种状态信息：LQI,ED 和 RX_STATUS。它们是在帧读取访问中自动附加的，参看 4.3.2 小节。也可通过寄存器访问获取 ED 值（寄存器 0x07,PHY_ED_LEVEL）和 FCS 准确性（寄存器 0x06，PHY_RSSI）等信息。

AT86RF212 的扩展操作模式支持帧过滤和未完成数据指示。

帧接收程序，包括无线电收发器的接收设置和帧缓冲 PSDU 数据读取，见于 8.1 小节。

7.2.2 配置

在基本操作模式中，通过在 TRX_OFF 或 PLL_ON 状态中在寄存器 TRX_CMD 位（寄存器 0x02,TRX_STATE）写入 RX_ON 命令启用接收器。在扩展操作模式中，可提供在 PLL_ON 状态下写入 RX_AACK_ON 命令启用 RX_AACK 操作的接收器。

当使用基本操作模式时，无须其他配置以接收 IEEE802.15.4 标准的合规帧。但是，在扩展模式中，帧接收还需要更多的寄存器配置。详情参看 5.2.2 小节。

可配置接收器的具体应用，以便处理标准环境，简化与微控制器的相互关系或操作不同的数据传输速率。

AT86RF212 接收器具有卓越的灵敏度性能。在某些条件下（参看 7.1.4 高数据传输速率模式，干扰层），可手动降低灵敏度。可通过寄存器 RX_PDT_LEVEL 位（寄存器 0x15,RX_SYN）调节同步头检测器阈值来实现此操作。RSSI 值低于阈值的接收信号不能激活解调处理。

此外，保护接收帧避免被后来的接收帧覆盖也可能有用。寄存器 RX_SAFE_MODE 位（寄存器 0x0C,TRX_CTRL_2）的设置可启用动态帧缓冲保护，见 9.7 小节。在 SPI 帧接收模式中，接收器一直处于 RX_ON 或 RX_AACK_ON 状态中，直至/SEL=H 指示微控制器已上载整个帧。只在 FCS 有效时对帧缓冲的内容进行保护。

可通过寄存器 RX_PDT_DIS 位（寄存器 0x15，RX_SYN）设置启用静态帧缓冲保护。接收器一直处于 RX_ON 或 RX_AACK_ON 状态，且不再检测 SHR 直至寄存器 RX_PDT_DIS 位设置返回。

7.2.3 寄存器说明

表 7-6 寄存器 0x19 (RF_CTRL_1)

位	7	6	5	4
名称	RF_MC	RF_MC	RF_MC	RF_MC
读取 / 写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0

位	3	2	1	0
名称	预留	预留	预留	预留
读取 / 写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0

• 7: 4位-RF_MC

此等寄存器位通过将电容切换至接地，对 RF 差分引脚 (RFN,RFP) 进行匹配控制，见图 2-2。此步骤可将各引脚电容提高 36fF。RF 引脚的电容设置对 RX 和 TX 操作有效。

表 7-7 RF 引脚匹配控制

寄存器位	值	RF 引脚电容[fF]
RF_MC	0	0
	1	36
	2	72
	3	108
	...	
	15	540

• 3:0 位-预留

寄存器 0x15 (RX_SYN):

此寄存器控制接收器的灵敏度阈值。

表 7-8 寄存器 0x15 (RX_SYN)

位	7	6	5	4
名称	RX_PDT_DIS	预留	预留	预留
读取/写入	R/W	R	R	R
复位值	0	0	0	0
位	3	2	1	0
名称	RX_PDT_LEVEL	RX_PDT_LEVEL	RX_PDT_LEVEL	RX_PDT_LEVEL
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0

• 第 7 位-RX_PDT_DIS

若 RX_PDT_DIS=1，那么即使无线电收发器处于接收模式中，仍会禁止帧接收操作。但正在进行的帧接收不会受到影响。

• 6: 4位-预留

• 3: 0 位-RX_PDT_LEVEL

可通过此等寄存器位灵敏度下降，从而不再接收 RSSI 电平低于阈值电平的帧（若 RX_PDT_LEVEL>0）。可按照以下格式计算阈值电平：

当 RX_PDT_LEVEL>0 时，RX_THRES=RSSI_BASE_VAL+RX_PDT_LEVEL*3

有关 RSSI_BASE_VAL 的说明见于 6.4.3 小节。

如果寄存器 RX_PDT_LEVEL 位=0(复位值), 则此功能被禁用, 灵敏度为最高。

如果寄存器 RX_PDT_LEVEL 位>0, 则 RX_ON 及 RX_AACK_ON 状态中的接收器当前耗电量降低 500 μ A。

7.3 发送器 (TX)

7.3.1 概览

AT86RF212 发送器使用直接上变频拓扑。数字发送器 (TX BBP) 生成调制信号的相内 (I) 和正交 (Q) 部分。数字-模拟转换器 (DAC) 形成模拟调制信号。正交混合器电耦将模拟调制信号转换至 RF 域。功率放大器 (PA) 向差分天线引脚 (RFP,RFN) 输送信号功率。LNA 和 PA 均内部连接至双向差分天线引脚, 从而无需外置天线开关。

在默认设置下, PA 含有可改善线性的均衡器。经过改善的线性仍保持发送频谱的低频谱旁瓣, 以便符合欧洲 868.3MHz 频段的要求。

若启动 PA 快速模式, 均衡器将失效。这样, 可将发送功率的传输提高到 10dBm, 同时频谱旁瓣和谐波功率的消耗也更高。

在基本操作模式中, 可通过在寄存器 TRX_CMD 位 (寄存器 0x02, TRX_STATE) 写入 TX_START 或引脚 SLP_TR 的上升沿从 PLL_ON 模式启动发送。

在扩展操作模式中, RX_AACK 或 TX_ARET 的处理相位可决定发送的自动启动, 参看 5.2 小节。

7.3.2 帧发送程序

帧发送程序, 包括在帧缓冲中写入 PSDU 数据及开始发送, 详见于 8.2 小节。

7.3.3 频谱屏蔽

AT86RF212 可在不同的频段中, 使用不同功率电平, 调制方式, 码片速率和频谱整形滤波器进行操作。占用的发送信号带宽取决于所选操作模式, 参看表 7-9。了解调制带宽, 功率频谱和旁瓣的信息对于进行适当的系统设置是至关重要的, 这样才能避免信道空间重叠。

表 7-9 调制, 频谱整形, 及占用带宽

调制	码片速率 [kchip/s]	频谱整形	占用带宽 99% [kHz]	20dB 带宽 [kHz]
BPSK	300	RC-1.0	385	430
	600	RC-1.0	750	825
O-QPSK	400	SIN and RC-0.2	370	400
	1000	SIN	1210	1230
		RC-0.8	1210	1300

图 7-4 至图 7-8 列出表 7-9 中的不同参数组合的功率谱。请注意并非所有的组合都与 IEEE802.15.4-2006 标准相符。频谱是 AT86RF212 默认设置下获取的数值。频谱分析仪的带宽分辨率被设置为 30kHz。视频带宽被设置为 10kHz。

图 7-4 BPSK 功率谱，码片速率为 300kchip/s

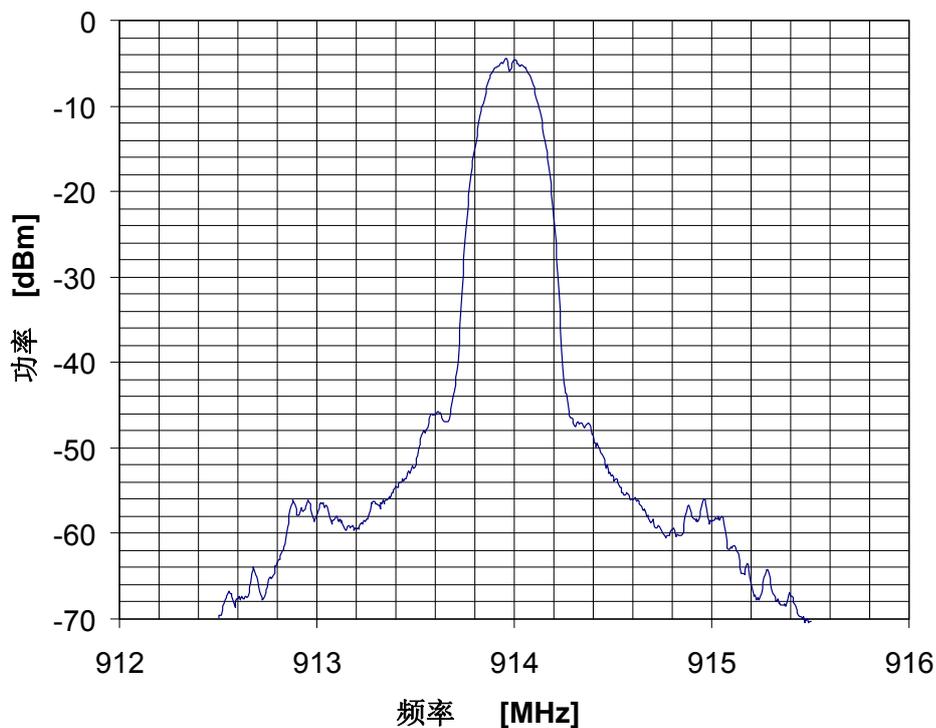


图 7-5 BPSK 功率谱, 码片速率为 600kchip/s

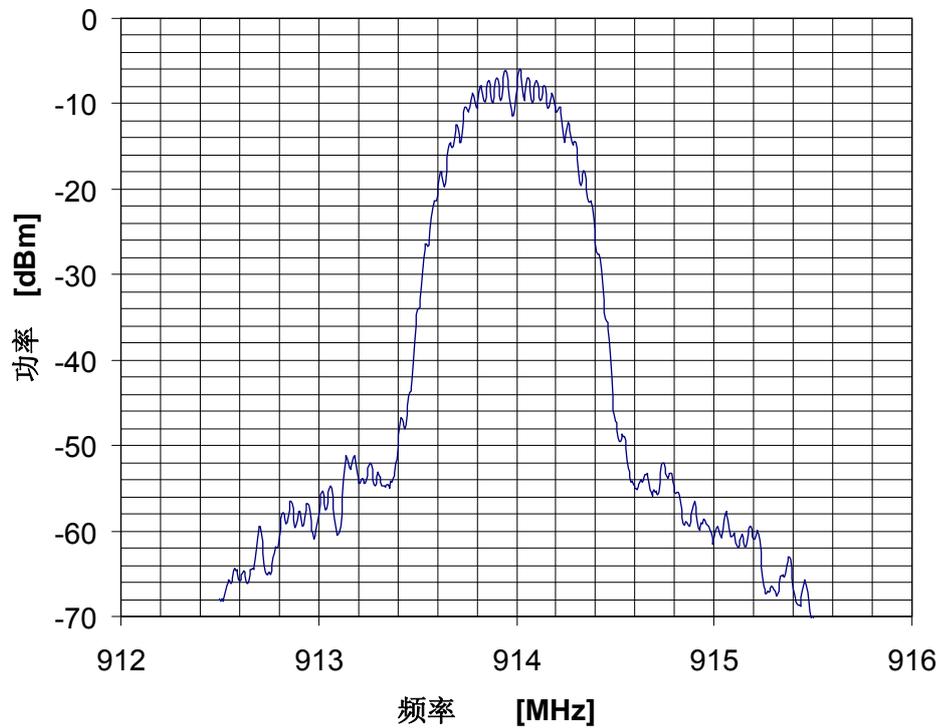


图 7-6 O-QPSK 功率谱, 码片速率为 400kchip/s

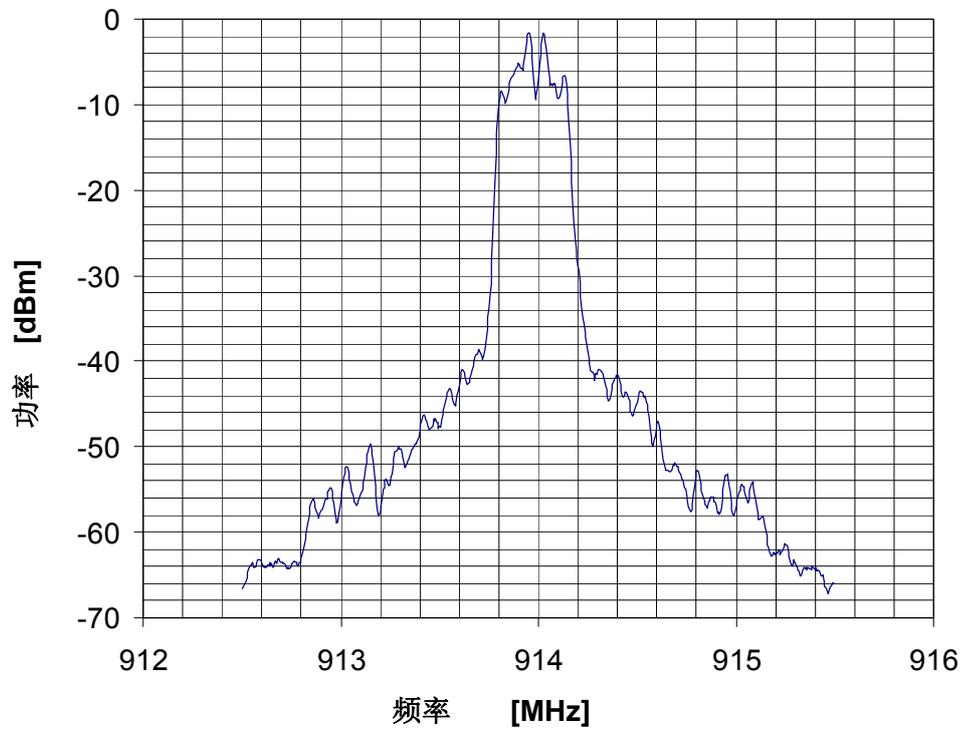


图 7-7 正弦波频谱整形 O-QPSK 功率谱，码片速率为 1000kchip/s

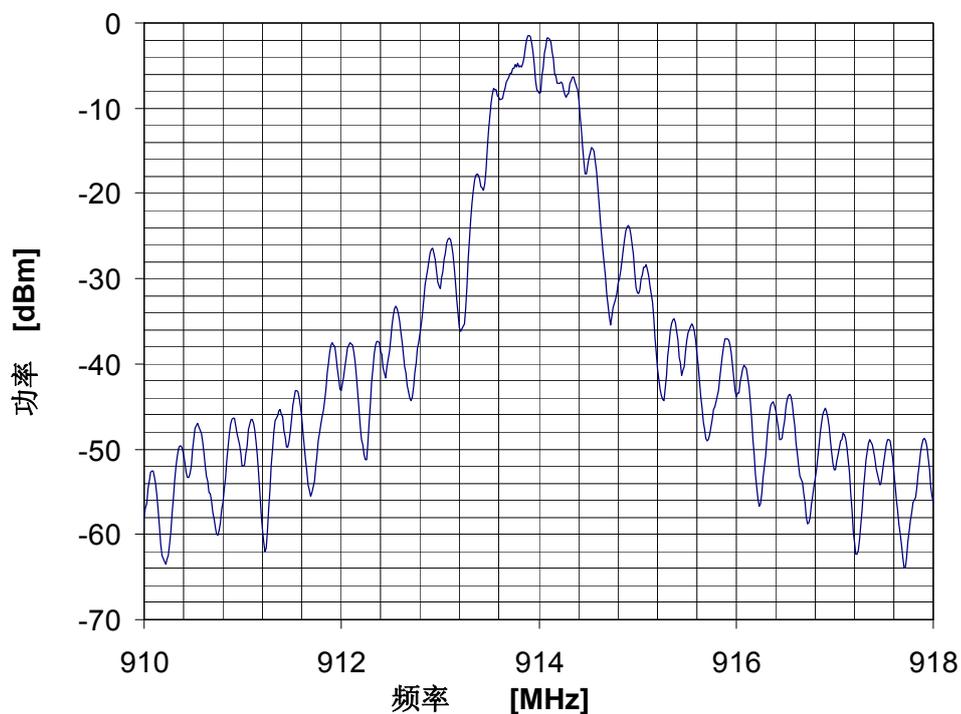


图 7-8 升余弦频谱整形 O-QPSK 功率谱，码片速率为 1000kchip/s

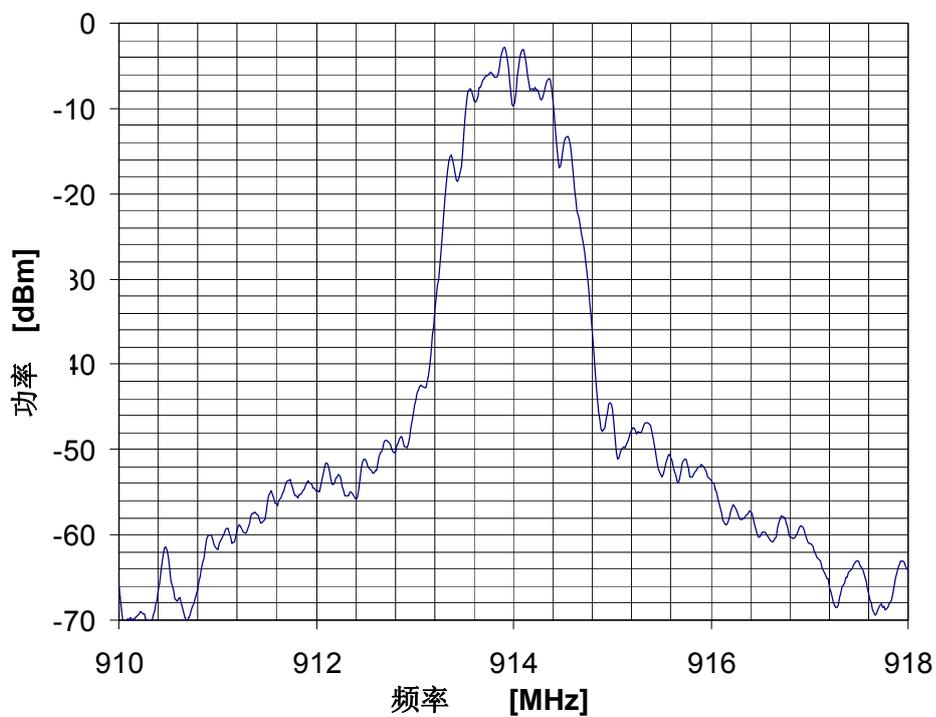


图 7-4 至图 7-8 列出了 AT86RF212 发送信号的典型频谱，无须任何限定。

关于功率谱密度掩码定义，杂散发射的定义，允许调制带宽，发送功率及其限制的更详细信息请参详当地管理机构（FCC,ETSI，等等）。

7.3.4 TX 输出功率

在正常模式下，发送器的输出功率最大值通常为 5dBm，在加速模式下为 10 dBm。可通过寄存器 TX_PWR 位（寄存器 0x05, PHY_TX_PWR）设置发送器输出功率。发送器的输出功率可控制在 11dBm 以下，分辨率为 1dB。

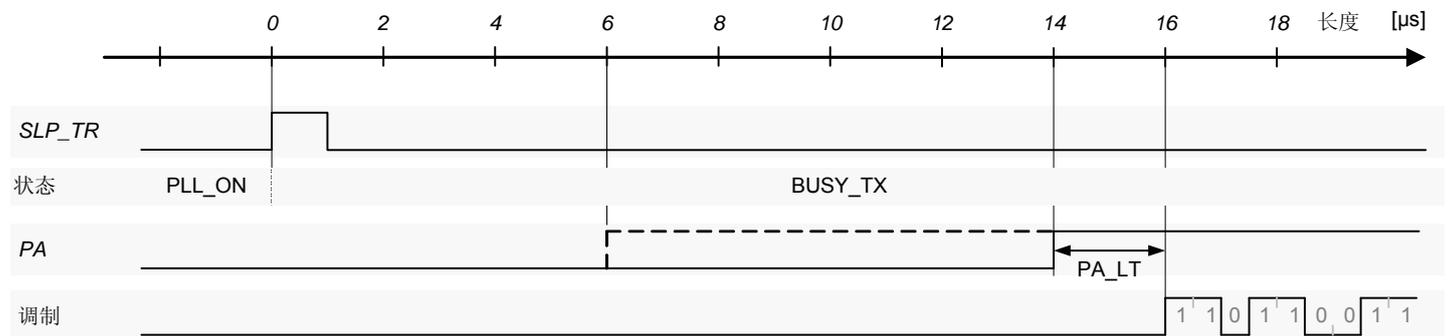
为了满足欧洲 868.3MHz 频段的频谱要求，必须通过适当的 TX_PWR, GC_PA 位（寄存器 0x05,PHY_TX_PWR）和 GC_TX_OFFS 位(寄存器 0x16, TX_CTRL_0)设置限制发送器功率，见表 7-15 和表 7-16。

7.3.5 TX 功率斜坡

为了优化输出功率谱密度（PSD），可先后单独启用各发送器模块。引脚 SLP_TR 的上升沿或寄存器 0x02 中的 TX_START 命令写入均可开始发送操作。一个符号周期之后，即开始发送。在此时间周期内，PLL 建立为发送使用的频率。在数据发送开始之前，启动 PA，以便可通过寄存器 0x16（RF_CTRL_0）中的 PA_LT 值调节 PA 的前置时间。通常，在对应 GC_PA=0 的最低增益值启用 PA。然后 PA 增益自动上升至寄存器 0x16（RF_CTRL_0）的 GC_PA 位设定的值。在发送完成之后，发送器功率斜坡沿反方向下降。

发送器管理斜坡的相关控制信号见于图 7-9。在此示例中，引脚 11（SLP_TR）的上升沿开始发送。无线电收发器状态由 PLL_ON 转换至 BUSY_TX。

图 7-9 发送器管理斜坡示例（O-QPSK 250kbit/s 模式）



在使用外置无线电频率（RF）前端时，（参看 9.4 小节）可能需要调节内部标准部件相应的外置 PA 的启动时间以便优化 PSD 整体。可通过寄存器 PA_LT 位（寄存器 0x16,RF_CTRL_0）实现此功能。

7.3.6 寄存器说明

寄存器 0x16 (RF_CTRL_0) :

寄存器含有用于配置发送路径的控制信号。

表 7-10. 寄存器 0x16 (RF_CTRL_0)

位	7	6	5	4
名称	PA_LT	PA_LT	预留	预留
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	1	1
位	3	2	1	0
名称	预留	预留	GC_TX_OFFS	GX_TX_OFFS
读取/写入	R	R	R/W	R/W
复位值	0	0	0	1

• 7: 6 位—PA_LT

此等寄存器位控制 PA 启动信号相对于发送数据开始的前置时间，见图 7-9。可使 PA 在发送信号开始前 2, 4, 6 或 8 μ s 启动。也可从引脚 DIG3/DIG4 输出 PA 启动信号，以便为外置无线电频率 (RF) 前端提供控制信号，详情参看 9.4 小节。

表 7-11 PA 启动相对于 TX 开启的前置时间

寄存器位	值	PA 启动前置时间[μ s]
PA_LT	0	2
	1	4
	2	6
	3	8

PA_LT 设置只在 TRX_OFF, PLL_ON 和 TX_ARET_ON 模式中有效。

• 5: 2 位—预留

• 1: 0 位—GC_TX_OFFS

此等寄存器位用于在 TX 功率控制字 (TX_PWR, 寄存器 0x05, PHY_TX_PWR) 和实际 TX 功率之间进行偏移。在将 TX 功率控制字应用于调节 TX 功率的电路块之前，在控制字上添加这两位字，可用于弥补调制方式决定的平均 TX 功率差分。

表 7-12 TX 功率偏量

寄存器位	值	TX 功率偏量[dB]
GC_TX_OFFS	0	-1
	1	0
	2	+1
	3	+2

寄存器 0x05 (PHY_TX_PWR):

此寄存器控制发送器输出功率。

表 7-13 寄存器 0x05 (PHY_TX_PWR)

位	7	6	5	4
名称	PA_BOOST	GC_PA	GC_PA	TX_PWR
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	1	1	0
位	3	2	1	0
名称	TX_PWR	TX_PWR	TX_PWR	TX_PWR
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0

• 第 7 位-PA_BOOST

此位可启动 PA 加速模式，当 PA_BOOST=1 时，TX 输出功率提高约 5 dB。在 PA 加速模式中，较之 PA_BOOST=0 时的正态分布模式，PA 的线性降低。因此，TX 功率谱的频谱旁瓣升高，斜坡功率升高。

因此，较高的 TX 功率设置不能满足欧洲 868.3MHz 频段的规管关于邻近频段杂散发射的要求（见 ETSI EN 300 220,ERC/REC70-03,和 ERC/DEC/(01)04）。

• 6: 5 位—GC_PA

此等寄存器位通过改变 PA 的偏置电流，控制 PA 增益。只能在 TRX_OFF 模式中对 GC_PA 进行设置。当通过 TX_PWR 控制字选择了一个低 TX 功率时，此位可用于降低 TX 模式中的电源电流。PA 偏置电流的下降导致 RF 增益和 PA 的 1dB 压缩点降低。因此，建议只将 PA 的降低偏置电流与 TX_PWR 的较低值结合使用。表 7-15 列出了 TX_PWR 和 GC_PA 之间的合理组合。

表 7-14 AT86RF212 相对于 GC_PA=3 的增益的 PA 增益下降

寄存器位	值	PA 增益[dB]
GC_PA	0	-2.9
	1	-1.3
	2	-0.9
	3	0

• 4: 0 位-TX_PWR

此等寄存器位控制发送器输出功率。TX_PWR 值表示相对于输出管理最大值的功率下降。当 GC_TX=0 时，输出功率达到最大值。分辨率为 1dB/步长。因为 TX_PWR 调节 PA 之前的 TX 通路中增益，所以就 PA 效率而言，PA 偏置设置并非适用于 TX_PWR 的最优化设置。

当 PA 偏置随着 TX 功率设置 (TX_PWR 值上升) 降低时 (GC_PA 值减小)，可提高 PA 功率效率。表 7-15 为 TX 功率控制 (TX_PWR)，PA 偏置控制 (GC_PA) 和 PA 加速模式 (PA_BOOST) 的推荐组合列表。列出了寄存器 0x05 中的 8 位字对应的 TX 功率建议对应。TX_PWR 值应在 0 至 12 的范围内，以便保证发送信号的质量。

表 7-15 TX 功率，频段与寄存器 0x05 值的推荐对应表

发射功率 [dBm]	寄存器 0x05 十六进制赋值								
	915 MHz 北美频段		868.3 MHz 欧洲频段		780 MHz 中国频段				
	PHY 模式: BPSK-40, OQPSK-SIN- 250/500/1000		PHY 模式: BPSK-20, OQPSK-SIN-RC-100/200/400		PHY 模式: OQPSK-RC- 250/500/1000				
		欧盟频段 1	欧盟频段 2						
10	0xc0	附注 1							
9	0xa1								
8	0x81								
7	0x82	附注 2							
6	0x83								
5	0x60					0xe7	附注 4	0xe7	
4	0x61	附注 3				0xe8		0xe8	
3	0x41					0xe9	附注 5	0xe9	
2	0x42					0x63		附注 4	0xea
1	0x22					0x64		0xcb	0xca
0	0x23					0x65		0xab	0xaa
-1	0x02		0x66	附注 5	0xab				
-2	0x03		0x46		0xad	0x45			
-3	0x04	0x26	0x48		0x25				
-4	0x05	0x05	0x27		0x03				
-5	0x06	0x06	0x06		0x04				
-6	0x07	0x07	0x07		0x05				
-7	0x08	0x08	0x08		0x06				
-8	0x09	0x09	0x09	0x07					
-9	0x0a	0x0a	0x0a	0x08					
-10	0x0b	0x0b	0x0b	0x09					
-11	0x0c	0x0c	0x0c	0x0a					

附注 1: 功率设置可适用于 BPSK 40 kbit/s 模式及 O-QPSK 250 kbit/s 模式。由于与传播范围较大的 250 kbit/s 模式相比，此等模式对非线性更为敏感，因此建议对 O-QPSK 500/1000 kbit/s 模式的最高输出功率加以限制。

附注 2: 功率设置可适用于 BPSK 40 kbit/s 模式与 O-QPSK 250/500 kbit/s 模式。

附注 3: 功率设置可适用于各种模式。

附注 4: 功率设置可用于 BPSK 20 kbit/s 模式。频谱旁瓣保持 < -40dBm。

附注 5: 功率设置可用于 BPSK 20 kbit/s 模式和 O-QPSK 100/200/400 kbit/s 模式。频谱旁瓣保持 < -40dBm。

北美对应表适用于最低电源电流。符合较宽泛的 IEEE802.15.4 标准的频谱旁瓣要求。

欧盟 1 和欧盟 2 对应表考虑到线性须保持频段外杂散发射在 ETSI 要求以下。

对应欧盟 1 使用的电源电流高于北美对应，并使用正态（线性化）PA 模式以便将 O-QPSK 100/200/400kbit/s 模式的介质输出功率提高到-1dBm，并将 BPSK 20kbit/s 模式的介质输出功率提高到 2dBm。

对应欧盟 2 使用加速模式以提高电源电流为代价提高 TX 功率电平。因此，100/200/400kbit/s 的 O-QPSK 的 TX 功率最大值为 3dBm，20kbit/s 的 BPSK 的 TX 功率最大值为 5dBm。

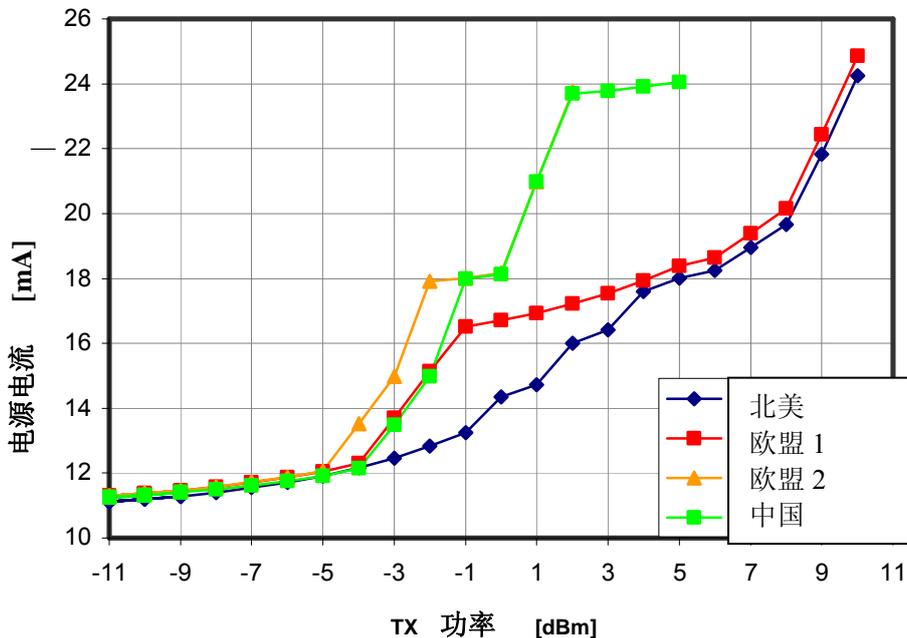
按照中华人民共和国无线电管理局对低功率（短波）无线电设备的技术要求规定，中国映射表所含频谱旁瓣必须保持< -36 dBm。

表7-15值均依照GC_TX_OFFS (寄存器 0x16, RF_CTRL_0)状态设置而定，该状态参数详见表 7-16。

表 7-16 GC_TX_OFFS 设置决定的模式

模式	BPSK	O-QPSK
GC_TX_OFFS	3	2

图 7-10 TX 功率设置决定 O-QPSK 调制电源电流示意图



7.4 帧缓冲

AT86RF212 带有一个 128 字节的双端口 SRAM。一个端口与 SPI 接口连接，另一个端口与内置发送器和接收器模块连接。两个端口的数据通信互相独立，可同时访问两个端口。

帧缓冲使用 SRAM 地址空间 0x00 至 0x7F 进行无线电收发器的接收和发送操作，并可一次保留一个 IEEE802.15.4 接收或一个最大长度的发送帧。

帧缓冲访问模式介绍见于 4.3.2 小节。欠载执行中断 IRQ_6(TRX_UR)指示帧缓冲访问冲突。请注意此中断在试图在帧缓冲内写入长度超过 127octet 的帧（超值）时发生。在此情况下，帧缓冲内容未定义。

若启动数字电源调节器，则只能访问帧缓冲。这在除睡眠状态以外的所有设备状态中都有效。只有在引脚 17 (CLKM) 提供 1 MHz 的主时钟时，可在 P_ON 状态下执行访问。

7.4.1 数据管理

下列操作将更改帧缓冲内的数据（接收数据或待发送数据）：

- 帧缓冲或 SRAM 对 SPI 的写入访问
- 在 BUSY_RX 或 BUSY_RX_AACK 状态中接收新帧
- 转换至睡眠模式
- 复位

默认设置并无帧缓冲防覆盖保护。因此，如果在帧缓冲读取访问先前收到的帧时进行帧接收，将发出中断请求 IRQ_6(TRX_UR)，而且存储的数据可能被覆盖。

尽管如此，如果 SPI 数据传输速率高于有效无线数据传输速率，则仍可读取帧数据。如果数据传输速率为 250kbit/s，那么建议使用最小值为 1MHz 的 SPI 时钟速率。最后，微控制器应通过 FCS 校验来检查传输的帧数据完整性。

为了保护帧缓冲内容不被最新输入帧覆盖，应在接收之后将无线电收发器状态转换为 PLL_ON。可在接收帧的同时或接收完成后立即在寄存器 TRX_CMD 位（寄存器 0x02,TRX_STATE）写入 PLL_ON 命令实现此目的。

或者，可使用动态帧缓冲保护以便保护接收帧不被覆盖，详细资料请参看 9.7 小节。

这两个程序都不能保护帧缓冲不被微控制器覆盖。

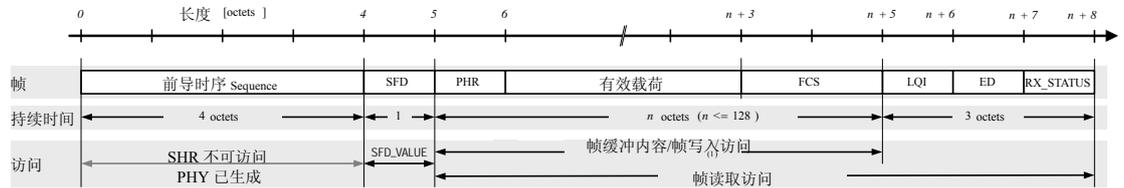
在扩展操作模式中的 TX_ARET 操作过程中，（见 5.2.4 小节），若先前发送的帧要求应答，则无线电收发器会切换至接收状态。在此期间，对接收帧进行评估但不存储在帧缓冲内。这样，无线电收发器就可以等待应答帧并在不重新写入帧的情况下进行帧重传。

除非转换到睡眠状态或复位状态，否则无线电收发器的状态改变并不影响帧缓冲的内容。如果无线电收发器转换到睡眠状态，那么帧缓冲就会关闭并且已存的数据也会丢失。

7.4.2 帧内容

AT86RF212 支持 IEEE802.15.4 标准的合规帧结构，如图 7-11 所示。

图 7-11. AT86RF212 帧结构



附注：1.如果 TX_AUTO_CRC_ON=1（寄存器 0x04,TXR_CTRL_1）,那么写入 FCS 可省略。

帧由两个部分组成，无线电收发器内部生成的 SHR 字段和存储在帧缓冲中的用户可访问部分。SHR 包括前导和 SFD 字段。可变帧部分含有 PHR 和 PSDU（含 FCS），见 6.3 小节。

请按照 4.3.2 小节中介绍的程序进行数据访问。

帧长度信息（PHR 字段）和 PSDU 存储在帧缓冲中。在帧接收过程中，还会保持接收帧的链路质量显示（LQI）值，能量检测（ED）值，和状态信息（RX_STATUS），分别参看 6.8，6.5 和 4.3.2 小节。无线电收发器在帧缓冲读取访问的过程中将上述值附加到帧数据上。

若使用 SRAM 读取访问读取 RX 帧，那么可在地址 0 访问帧长度字段（PHR）。微控制器不可读取 SHR(除 SFD 值用于生成 SHR 以外)。

要发送帧，则须将 PHR 和 PSDU 存储在帧缓冲内。无线电收发器支持的帧缓冲最大容量为 128 字节。若在寄存器 0x05(PHY_TX_PWR)中设置了 TX_AUTO_CRC_ON 位，则会在帧发送过程中用计算的 FCS 自动替换 PSDU 的 FCS 字段。当使用自动 FCS 生成时，无须写入 FCS 字段。

要对帧缓冲中的个别字节进行处理，则可使用 SRAM 写入访问。

非 IEEE802.15.4 标准合规帧的无线电收发器支持帧长度最小值为一字节（帧长度字段+1 字节的数据）。

7.4.3 中断处理

当读取和写入数据在帧缓冲，TX/RX BBP 和 SPI 的各独立部分同时进行，可能会发生访问冲突。这些端口有自己的地址计数器，可指示帧缓冲的当前地址点位。

当 SPI 端口地址计数器值大于或等于 TX/RX BBP 端口时，在发生帧缓冲读取或写入访问的过程中，会发生访问冲突。

在接收帧的同时，首先须在读取之前将数据存储于帧缓冲中。可通过在中断 IRQ_2(RX_START) 至少 8 个符号周期 (BPSK) 或 2 个符号周期 (O-QPSK) 以后，再访问帧缓冲来保证上述要求。在连续读取帧数据时，SPI 数据传输速率将低于当前的 TRX 比特率，以避免欠载执行中断发生。为了避免冲突并简化帧缓冲读取访问，可使用帧缓冲空闲指示，详情参看 9.6 小节。

在发送过程中，当 SPI 端口地址计数器值低于或等于 TX BBP 端口时，会在帧缓冲写入访问中发生访问冲突。

两种访问冲突都可能造成数据损坏，在帧缓冲读取模式下，IRQ_6(TRX_UR) 中断将指示冲突。请注意，当使用 SRAM 访问模式时，不会指示任何访问冲突。

当在帧发送的过程在帧缓冲写入数据时，SPI 数据传输速率将高于 PHY 数据传输速率，以避免欠载执行。必须在 SFD 发送完成之前，在帧缓冲中提供 PSDU 数据的第一个字节，自 SLP_TR 引脚的上升沿开始 (见图 5-2) BPSK 的 SFD 发送耗时 41 个符号周期 (1 符号的 PA 上斜坡+40 个符号的 SHR)，而 O-QPSK 的 SFD 发送耗时为 11 个符号周期 (1 符号的 PA 上斜坡+10 个符号的 SHR) (参看图 5-2)。

附注

- 中断 IRQ_6(TRX_UR) 在 IRQ_2(RX_START) 之后 1 octet 内有效。当在 RX_START 中断之后的第一个八位字节和第二个八位字节之间读取帧缓冲的第一个字节时，将忽略发生的中断。
- 如果帧缓冲读取访问在新帧接收时并未完成，那么将发生 TRX_UR 中断。然而，只要 SPI 数据传输速率高于有效 PHY 数据传输速率，就可以读取老的帧数据。在此情况下建议使用最小值为 1MHz 的 SPI 时钟速率。最后，微控制器应通过计算 FCS 校验传输的帧数据的完整性。

7.5 电压调节器 (AVREG, DVREG)

电压调节器模块的主要特点有：

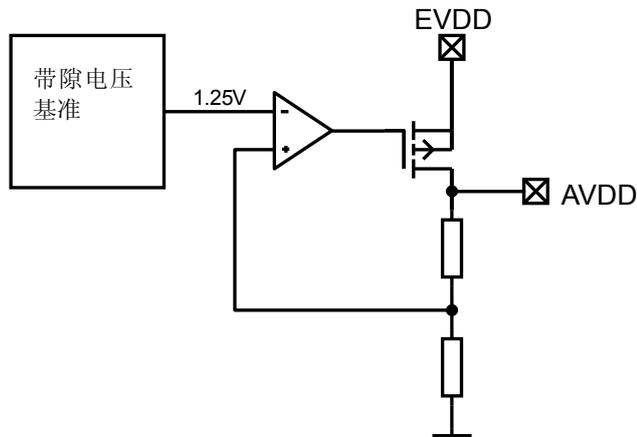
- 为模拟和数字域提供 1.8V 带隙稳压电源
- 低压差 (LDO) 电压调节器
- 配置为外置电压调节器使用

7.5.1 概览

内置电压调节器向 AT86RF212 输送稳定电压。AVREG 向模拟模块提供 1.8V 稳压电源，DVREG 向数字模块输送 1.8V 的电源电压。

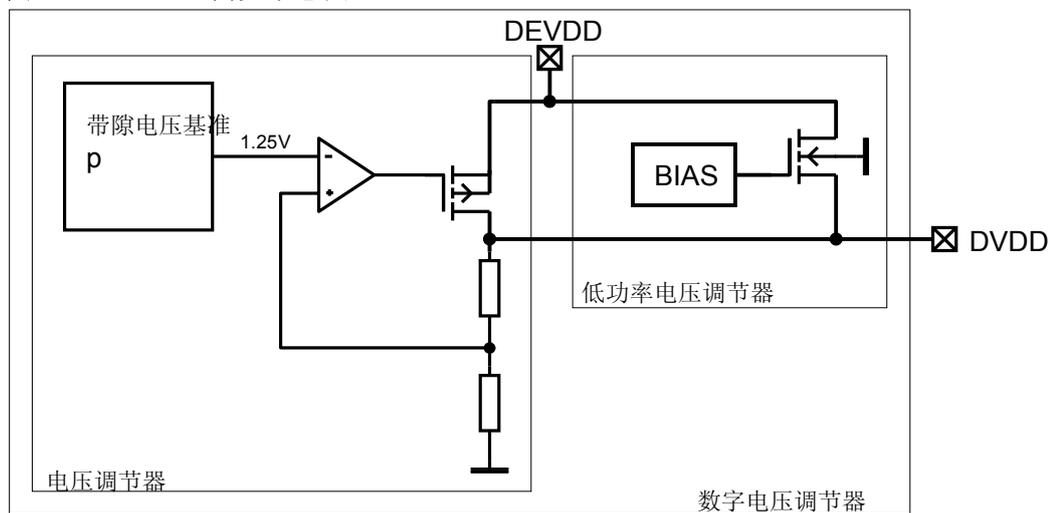
内置模拟电压调节器的简要示意图如图 7-12 所示。

图 7-12 AVREG 简要示意图



内置数字电压调节器的简要示意图如图 7-13 所示。

图 7-13. DVREG 简要示意图



“数字电压调节器”中的“低功率电压调节器”模块在电压调节器不可用时继续维持 DVDD 的电源电压，睡眠模式下的情况就是如此（参看图 7-13）。如果 AT86RF212 进入睡眠模式，DVDD 电压将下降至 1.5V（标准值），并存储所有配置寄存器值。

低功率电压调节器常开。因此其偏置电流即是睡眠模式中的泄露电流，约为 100nA(标准值)。

低功率电压调节器（AVREG/DVREG）需要旁路电容以便稳定操作。旁路电容值决定了电压调节器建立时间。旁路电容应置于尽量靠近引脚的位置，并在最短的路径内接地（见表 3-1）。

7.5.2 配置

可通过寄存器 0x10 (VREG_CTRL) 配置电压调节器。

建议使用内置电压调节器，但也可提供外置电源供应低电压域。在此配置中，须通过将寄存器 AVREG_EXT 设置为 1 并将 DVREG_EXT 位设置为 1 关闭内置调节器。须将 1.8V 外置稳压电源连接到引脚 13, 14 (DVDD) 和 29 (AVDD)。当打开外部电源时，保证 AT86RF212 互相作用之前有足够长的稳定时间。

7.5.3 数据解释

寄存器 0x10(VREG_CTRL)的状态位 AVDD_OK=1 和 DVDD_OK=1 表示已启用稳定的内置电源电压。读取值 0 表示禁用电压调节器或未建立内置电源电压的最终值。设置 AVRED_EXT=1 和 DVREG_EXT=1 将 AVDD_OK 和 DVDD_OK 的信号强制设定为 1。

7.5.4 寄存器说明

寄存器 0x10(VREG_CTRL):

此寄存器控制电压调节器的使用并指示其状态。

表 7-17 寄存器 0x10(VREG_CTRL)

位	7	6	5	4
名称	AVREG_EXT	AVDD_OK	预留	预留
读取 / 写入	R/W	R	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0
位	3	2	1	0
名称	DVREG_EXT	DVDD_OK	预留	预留
读取 / 写入	R/W	R	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0

• 第 7 位-AVREG_EXT

如果设置此寄存器位，则会禁用内置模拟电压调节器，并对模拟电路模块使用 1.8V 外置稳压电源。

表 7-18 模拟电路模块的稳压电源控制

寄存器位	值	说明
AVREG_EXT	0	模拟模块启用内置电压调节器
	1	禁用内置模拟电压调节器，并对模拟元件模块使用 1.8V 外置稳压电源

• 第 6 位-AVDD_OK

此寄存器位指示内置 1.8V 稳压电源 AVDD 是否已固定。若 AVREG_EXT=1,此位被建立为高电平逻辑。

表 7-19 模拟电路模块的稳压电源控制

寄存器位	值	说明
AVDD_OK	0	模拟电源调节器禁用或电源电源不稳定
	1	模拟电源电压已建立

• 5: 4位-预留

• 第3位-DVREG_EXT

若设置此寄存器位，则将禁用内置数字电压调节器，并对数字电路模块应用 1.8V 的外置稳压电源。

表 7-20. 数字电路模块的稳压电源

寄存器	值	说明
DVREG_EXT	0	内置电压调节器启用，数字模块
	1	内置电压调节器禁用，为数字模块使用外置 1.8V 稳压电源

• 第2位-DVDD_OK

此寄存器位指示内置 1.8V 稳压电源 DVDD 是否已建立。若 DVREG_EXT=1,此位被设置为高电平逻辑。

表 7-21 数字电路模块的稳压电源

寄存器位	值	说明
DVDD_OK	0	数字电源调节器禁用或电源电源不稳定
	1	数字电源电压已建立

附注

• 当此位复原值为 0 时，只有在 DVREG 可用的情况下，方可对寄存器进行实际访问。因此，此位通常设置为 1。

• 1: 0位-预留

寄存器 0x0C (TRX_CTRL_2):

此寄存器控制 TRX 的操作。

表 7-22. 寄存器 0x0C (TRX_CTRL_2)

位	7	6	5	4
名称	RX_SAFE_MODE	TRX_OFF_AVD_D_EN	OQPSK_SCRAM_EN	OQPSK_SUB1_RC_EN
读取 / 写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	1	0
位	3	2	1	0
名称	BPSK_OQPSK	SUB_MODE	OQPSK_DATA_RATE	OQPSK_DATA_RATE
读取 / 写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	1	0	0

• **第 6 位-TRX_OFF_AVDD_EN**

如果设置此寄存器位，则在 TRX_OFF 的过程中，启动模拟电压调机器，以便使接收/发送在时间上运转得更快。耗电量上升 100 μ A（标准值）。

7.6 电池监测器 (BATMON)

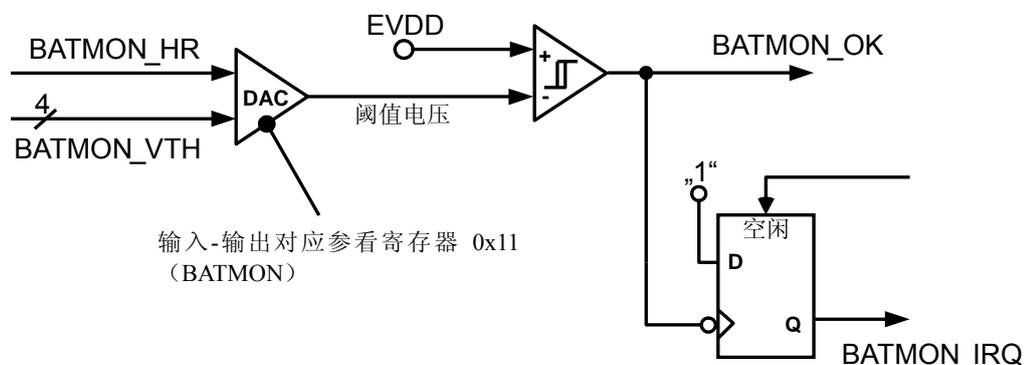
电池监测器的主要特点有：

- 可配置电压阈值范围：1.7V 至 3.675V
- 当电源电压降至阈值以下时，生成中断
- 可在寄存器位中监测电流状态

7.6.1 概览

电池监测器 (BATMON) 检测并指示引脚 28 (EVDD) 处的外置电源电压的低电源电压。通过将外置电源的引脚 28 (EVDD) 与可配置内置阈值电压比较实现检测与指示。图 7-14 为 BATMON 的简要示意图，并标出了最重要的输入和输出信号。

图 7-14 BATMON 简要示意图



7.6.2 配置

可通过寄存器 0x11 (BATMON) 对 BATMON 进行配置。寄存器子字段 BATMON_VTH 设置阈值电压。可在高电压范围 (BATMON_HR=1) 内，按 75 mV 的分辨率进行配置，并在低电压范围内 (BATMON_HR=0) 按 50mV 的分辨率进行配置，详细信息请参看寄存器 0x11(BATMON)。

7.6.3 数据解释

寄存器 BATMON_OK 位 (寄存器 0x11,BATMON) 代表电源电压的当前值：

- 若 BATMON_OK=0,则电源电压低于阈值电压
- 若 BATMON_OK=1,则电源电压高于阈值电压

在设置新阈值之后，应读取 BATMON_OK 值以便检验当前电源电压值。

请注意，电池监测器在 P_ON 和睡眠状态中不可用，参看状态寄存器 0x01(TRX_STATUS)。

7.6.4 中断处理

中断 IRQ_7(BAT_LOW)指示电源电压降至配置的阈值以下，见 4.7 小节。请注意只在 BATMON_OK 从 1 变为 0 时，发出中断请求。

在下列情况下，将不生成任何中断：

- 上电时，电源电压低于默认的 1.8V 阈值（BATMON_OK 总不为 1），或
- 设置新阈值，且该值仍高于当前电源电压（BATMON_OK 保持为 0）。

当电池电压接近设置的阈值电压时，噪声电压或电压暂降可能生成中断。为了避免这种情况的发生：

- 禁用寄存器 0x0E(IRQ_MASK)上的 IRQ_7(BAT_LOW)并将电池视为电量为空，或
- 设置更低的阈值电压

7.6.5 寄存器说明

寄存器 0x11 (BATMON)：

此寄存器配置用于将引脚 28 电源电压 (EVDD) 和阈值电压进行比较的电池监测器。此外，可依据 BATMON 的实际设置，通过寄存器 BATMON_OK 位读取引脚 28 的电源电压状态 (EVDD)。

表 7-23. 寄存器 0x11 (BATMON)

位	7	6	5	4
名称	预留	预留	BATMON_OK	BATMON_HR
读取/写入	R	R/W	R	R/W
复位值	0	0	0	0
位	3	2	1	0
名称	BATMON_VTH	BATMON_VTH	BATMON_VTH	BATMON_VTH
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	1	0

• 7: 6 位-预留

• 第 5 位-BATMON_OK

寄存器 BATMON_OK 位依照程序设置的阈值 BATMON_VTH，指示外置电源电压电平。

表 7-24. 电池监测器状态

寄存器位	值	说明
BATMON_OK	0	电池电压低于阈值。
	1	电池电压高于阈值。

• 第 4 位-BATMON_HR

寄存器 BATMON_HR 位设置电池监测器的量程和分辨率。

表 7-25 电池监测器量程选择

寄存器位	值	说明
BATMON_HR	0	启用低电压量程, 见 BATMON_VTH
	1	启用高电压量程, 见 BATMON_VTH

• 3: 0 位-BATMON_VTH

电池监测器阈值设置有寄存器 BATMON_VTH 位完成:

表 7-26. 电池监测器阈值电压

赋值 BATMON_VTH[3: 0]	电压[V] BATMON_HR=1	电压[V] BATMON_HR=0
0x0	2.550	1.70
0x1	2.625	1.75
<u>0x2</u>	2.700	<u>1.80</u>
0x3	2.775	1.85
0x4	2.850	1.90
0x5	2.925	1.95
0x6	3.000	2.00
0x7	3.075	2.05
0x8	3.150	2.10
0x9	3.225	2.15
0xA	3.300	2.20
0xB	3.375	2.25
0xC	3.450	2.30
0xD	3.525	2.35
0xE	3.600	2.40
0xF	3.675	2.45

7.7 晶体振荡器 (XOSC) 及时钟输出 (CLKM)

主要特点为:

- 16MHz 幅度控制晶体振荡器
- 退出睡眠状态后迅速建立时间
- 可配置微调电容阵列
- 可配置时钟输出 (CLKM)

7.7.1 概览

晶体振荡器为 AT86RF212 提供基准频率。无线电收发器生成的其他所有内部频率均出自此频率。因此, 整个系统的性能主要取决于晶体基准频率。应认真挑选晶体振荡器外置部件, 并谨慎处理在相关电路板的设计 (见第 3 章)。

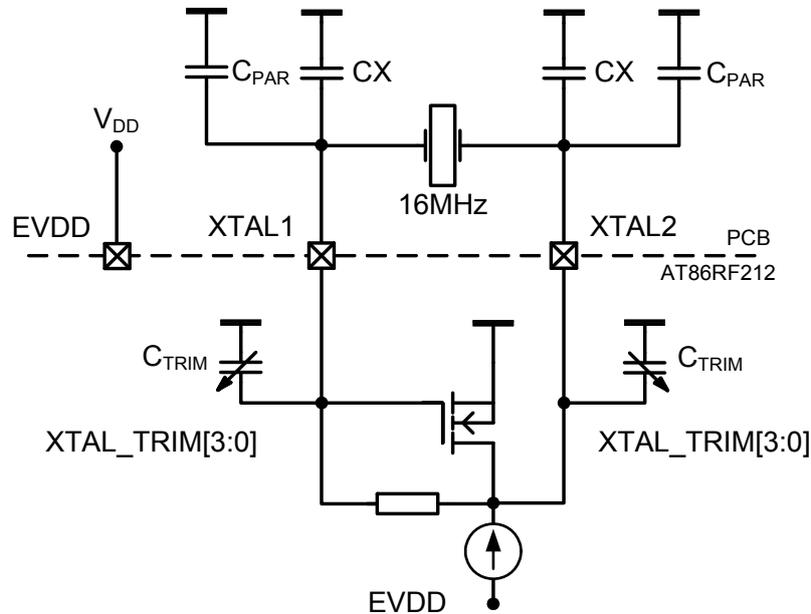
支持两种操作模式。推荐模式为如图 7-15 所述的集成振荡器结构。或者, 也可通过外置时钟基准为内部电路提供基准频率, 如图 7-16 所示。寄存器 0x12(XOSC_CTRL)负责配置 XOSC 的操作模式。

7.7.2 集成振荡器设置

当使用内置振荡器时，振荡频率取决于晶体引脚 XTAL1 和 XTAL2 之间的负载电容。总负载电容 C_L 必须等于规定的晶体自身负载电容。它包括连接 XTAL 节点的外置电容 CX 和寄生电容。

图 7-15 列出了所有寄生电容，包括 PCB 杂散电容和引脚输入电容等，统称为 C_{PAR} 。

图 7-15 XOSC 及外置部件简要示意图



还可使用其他内置微调电阻 C_{TRIM} 。可通过寄存器 0x12 (XOSC_CTRL) 的 XTAL_TRIM 位在 0pF 至 4.5pF 的范围内进行选择，分辨率为 0.3pF。使用以下公式计算总负载电容

$$C_L = 0.5 \cdot (CX + C_{TRIM} + C_{PAR})$$

微调电容可减少因产生过程变化或外置部件公差而引起的频率偏差。请注意只能通过提高微调电容来降低振荡频率。因 C_{TRIM} 一步引起的频率偏差随着晶体负载电容值的升高而降低。

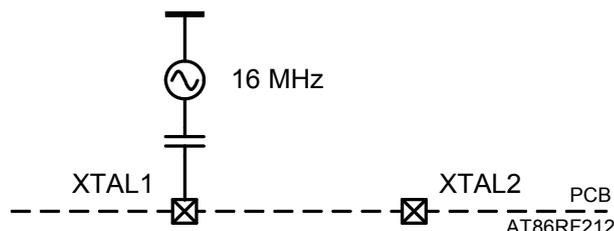
幅度控制电路用于保证在不同操作模式下和适用于不同晶体类型的稳定操作。在 P_ON 状态下及退出睡眠状态后启动晶体振荡器时，会使幅度建立相的电流微微升高以便保证缩短启动时间。在稳定操作中，电流降低到稳定操作所必需的值，并保持晶体的低激励功率。

通常而言，晶体的负载电容越高，对因外置部件变化或电路板及电流寄生变化而造成的寄生牵引效应的敏感度越低。另一方面，晶体的负载电容越高，其启动时间就越长，稳定状态下的耗电量也越大。

7.7.3 外置基准频率设置

当使用外置基准频率时，须将信号接至引脚 26 (XTAL1) (如图 7-16 所示)，寄存器 XTAL_MODE 位 (寄存器 0x12, XOSC_CTRL) 须设置为外置振荡器模式。振荡峰间幅度应在 100mV 至 500mV 之间，且最佳范围应在 400mV 至 500mV 之间。引脚 25 (XTAL2) 不应接线。请注意外置基准的质量 (即，相位噪声) 决定了系统的性能。

图 7-16. 外置频率基准应用设置



7.7.4 主时钟信号输出 (CLKM)

可通过引脚 17 (CLKM) 将生成的基准时钟信号输送至微控制器。预分频器对内置 16MHz 原始时钟进行分割。因此，引脚 CLKM 可发出 16MHz、8MHz、4MHz、2MHz、1MHz 和 250kHz, 或当前 SHR 符号率频率的时钟频率。

寄存器 0x03 (TRX_CTRL_0) 负责配置 CLKM 频率及引脚驱动强度。可通过两种方式实现 CLKM 频率变化。若 CLKM_SHA_SEL=0, 则改变寄存器 CLKM_CTRL (寄存器 0x03, TRX_CTRL_0) 会立即对 CLKM 时钟速率产生影响。反之 (CLKM_SHA_SEL=1), 则在下一次退出睡眠状态时，出现新的时钟速率。

为了降低功耗并减少杂散发射，建议在不使用时关闭 CLKM 时钟，或将驱动强度降至最低，参看 2.2.2 小节。

CLKM 复位操作

在复位程序中 (见 5.1.4.5 小节)，寄存器 CLKM_CTRL 位变为灰色。虽然 CLKM 时钟设置在复位后仍然保持不变，但对寄存器 CLKM_CTRL 位进行读取访问会发送复位值 1。因此，建议在复位之前先将以前的配置写入寄存器 CLKM_CTRL 位，以便将无线电收发器的操作与寄存器配置对应起来。反之，在下一个睡眠周期之后，CLKM 时钟速率会返回复位值 (1MHz)。

例如，如果 CLKM 时钟速度配置为 16MHz。在复位之后，CLKM 时钟速率仍为 16MHz，但是，寄存器 CLKM_CTRL 位则返回复位值 1。由于 CLKM_SHA_SEL 复位值为 1，如不更新 CLKM_CTRL 设置，那么在下一个睡眠周期之后，CLKM 时钟速率将变为 1MHz。

7.7.5 时钟振荡器

AT86RF212 的接收器敏感度可达-110dBm。检测这种低射频信号需要非常清静的场景，不得出现噪音及干扰。如果它们干扰需要的射频信号，则可能破坏数字信号谐波的效果。数字信号的小时钟振荡器可将谐波延展到更宽的频率范围，从而降低某些频谱线的强度。AT86RF212 提供此类时钟振荡器作为选配功能。振荡器模块为接收器部分及所有输入/输出信号工作，如 CLKM（如果激活）。发射器部分与射频频率的生成不会受到影响。

7.7.6 寄存器说明

寄存器 0x03 (TRX_CTRL_0) :

表 7-27 寄存器 0x03 (TRX_CTRL_0)

位	7	6	5	4
名称	PAD_IO	PAD_IO	PAD_IO_CLKM	PAD_IO_CLKM
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	1

位	3	2	1	0
名称	CLKM_SHA_SEL	CLKM_CTRL	CLKM_CTRL	CLKM_CTRL
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	1	0	0	1

TRX_CTRL_0 寄存器控制数字输出和 CLKM 时钟速率的驱动电流。建议使用驱动电流最小值以便降低耗电量和信号谐波的发生。

• **7: 6 位-PAD_IO**

参看 2.2.2.3 小节。

• **5: 6 位-PAD_IO_CLKM**

此等寄存器位设置 CLKM 引脚的输出驱动强度。如果可能，建议将驱动强度降低至 2mA(PAD_IO_CLKM=0)，从而降低功耗和杂散发射。

表 7-28 CLKM 驱动强度

寄存器位	值	说明
PAD_IO_CLKM	0	2mA
	1	4mA
	2	6mA
	3	8mA

• **第 3 位—CLKM_SHA_SEL**

寄存器 CLKM_SHA_SEL 位设定是否在下一个睡眠周期后立即设定由 CLKM_CTRL 定义的新时钟速率或使之生效。

表 7-29. CLKM 时钟速率更新设置

寄存器位	值	说明
CLKM_SHA_SEL	0	立即执行 CLKM 时钟速率改变
	1	在睡眠周期后执行 CLKM 时钟速率改变

• 2: 0 位—CLKM_CTRL

此等寄存器位设置引脚 17 (CLKM) 的时钟速率。

表 7-30. 引脚 CLKM 的时钟速率设置

寄存器位	值	说明
CLKM_CTRL	0	引脚17 (CLKM) 无时钟, 引脚置于为逻辑低频位置
	1	1MHz
	2	2 MHz
	3	4 MHz
	4	8 MHz
	5	16 MHz
	6	250 kHz

寄存器位	值	说明		
		IEEE802.15.4 符号率频率		
7		BPSK_OQPSK ⁽¹⁾	SUB_MODE ⁽¹⁾	频率
		0	0	20kHz
		0	1	40 kHz
		1	0	25 kHz
		1	1	62.5 kHz

附注: 1. 参看 7.1.5 小节

寄存器 0x12 (XOSC_CTRL):

寄存器 XOSC_CTRL 配置晶体寄存器。

表 7-31. 寄存器 0x12 (XOSC_CTRL)

位	7	6	5	4
名称	XTAL_MODE	XTAL_MODE	XTAL_MODE	XTAL_MODE
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	1	1	1	1
位	3	2	1	0
名称	XTAL_TRIM	XTAL_TRIM	XTAL_TRIM	XTAL_TRIM
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0

• 7:4 位—XTAL_MODE

此等寄存器位设置晶体振荡器的操作模式, 见表 7-32。

表 7-32. 晶体振荡器操作模式

寄存器位	值	说明
XTAL_MODE	0x4	禁用内置晶体振荡器，使用外置基准频率
	0xF	启用内置晶体振荡器
	其他	预留

• 3:0 位-XTAL_TRIM

寄存器 XTAL_TRIM 位控制与引脚 XTAL1 和 XTAL2 连接的两个内置电容阵列。可选择在 0pF 到 4.5pF 之间电容值，分辨率为 0.3pF。

表 7-33. 晶体振荡器微调电容

寄存器位	值	说明
XTAL_TRIM	0x0	0.0 pF
	0x1	0.3 pF
	...	
	0xF	4.5 pF
	其他	预留

寄存器 0x0A (RX_CTRL):

寄存器 RX_CTRL 配置时钟振荡器寄存器。

表 7-34. 寄存器 0x0A (RX_CTRL)

位	7	6	5	4
名称	预留	预留	JCM_EN	预留
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	1	0	0	1
位	3	2	1	0
名称	预留	预留	预留	预留
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	1	1	1

• 7:6 位-预留

• 5 位-JCM_EN

若设置该位，则激活振荡器模块。

• 4: 0 位-预留

7.8 频率合成器 (PLL)

PLL 的主要特点有:

- 位所有支持信道生成 RX/TX 频率
- 保证操作范围内的稳定操作的自动校准环
- 两个 PLL 状态指示中断
- 支持跳频的快速 PLL 建立

7.8.1 概览

PLL 为 AT86RF212 生成 RF 频率。在接收和发送操作过程中，频率合成器用作本地振荡器，执行 N 分数锁相环的分相误差模拟补偿。VCO 以双倍的 RF 频率运行。

两个校准环保证了 PLL 功能在规定操作限值下的正确执行。

7.8.2 RF 信道选择

PLL 设计用于支持：

- 4 个符合 IEEE802.15.4c 标准的中国 WPAN 频率范围在 779 至 787MHz 之间信道，信道间隔为 2MHz。中心频率为 780，782，784 和 786MHz。
- 一个符合 IEEE 802.15.4 标准的欧洲 SRD 频率范围在 863 至 870MHz 之间的 868.3MHz 信道(信道 k=0)
- 10 个符合 IEEE 802.15.4-2006 标准的北美 ISM 频率范围在 902 至 928MHz 之间信道，信道间隔为 2MHz。这些信道的中心频率定义为

$$F_c = 906 + 2 (k-1) \text{ [MHz]}$$

其中 k 为从 1 到 10 的信道数。

- 按照 IEEE P802.15.4c 标准的规定，中国 WPAN 频段中的 4 个信道为 779 至 787MHz，信道间隔为 2MHz。中心频率为 780，782，784 及 786MHz。

此外，PLL 支持在 769-935MHz 范围内的所有频率，各频率间隔为 1MHz，还支持 3 个 100kHz 的在 769-794.5MHz, 857-882.5MHz 和 903-928.5MHz 之间的频段。

寄存器 0x13 (CC_NUMBER,CC_CTRL_0[7: 0]) 和 0x14(CC_BAND,CC_CTRL_1[2:0])选择频率。表 7-35 列出了寄存器 CC_CTRL_0 和 CC_CTRL_1 的设置。

表 7-35 频率范围与信道数

CC_BAND, CC_CTRL_1	CC_NUMBER, CC_CTRL_0	说明
0	不使用	IEEE 802.15.4标准规定的欧盟及北美信道；由寄存器位 CHANNEL（寄存器0x08, PHY_CC_CCA）选择频率，参见7.8.6小节。
1	0-255	769 – 794.5 MHz; $F_c = 769 + 0.1 * CC_CTRL_0$ [MHz]
2	0-255	857 – 882.5 MHz; $F_c = 857 + 0.1 * CC_CTRL_0$ [MHz]
3	0-255	903 – 928.5 MHz; $F_c = 903 + 0.1 * CC_CTRL_0$ [MHz]
4	0-94	769 – 863 MHz; $F_c = 769 + CC_CTRL_0$ [MHz]
5	0-102	833 – 935 MHz; $F_c = 833 + CC_CTRL_0$ [MHz]
6,7	0-255	预留

PLL_ON 和接收状态下的 PLL 频率比发送状态下的 PLL 频率低 1MHz。

7.8.3 PLL 建立时间与频率敏捷度

当启用 PLL 时,从 TRX_OFF 转换为 PLL_ON 的状态转换过程中的建立时间标准值 $t_{TR4}=110\ \mu\text{s}$ ($50\ \mu\text{s}$ 加 $60\ \mu\text{s}$ 的 AVREG 调节器模拟电压建立时间),包括 PLL 自身校准,参看表 5-1 及第 7.8.4 小节。中断 IRQ_0(PLL_LOCK)指示 PLL 锁定。

在 PLL_ON 或 RX_ON 状态下的相同频段信道间切换通常使用 $t_{TR20}=11\ \mu\text{s}$ 进行。因此,无线电收发器非常适合频率切换的应用。

在 PLL_ON 状态和接收状态中,PLL 建立为接收频率。

当开始发送程序时,PLL 频率在开始发送前 $t_{TR23}=16\ \mu\text{s}$ 以内转为发送频率。发送之后,PLL 在 $t_{TR24}=32\ \mu\text{s}$ 以内建立返回接收频率。此频率转换不生成中断 IRQ_0(PLL_LOCK)或 IRQ_1(PLL_UNLOCK)。

7.8.4 校准环

由于温度,电源电压和中心频率的变化,VCO 特性可能发生变化。

为了保证稳定操作,单片机执行两个自动控制环:中心频率和延时元件校准。当在 TRX_OFF 至 PLL_ON 或 RX_ON 的状态转换过程中启用 PLL 时,两个校准环均自动开启。此外,当 PLL 变为不同的频率设置时,也会自动开启两个校准环。

若长时间在同一信道操作 PLL 或工作环境温度急剧变化,应手动开启校准环。建议校准间隔期为 5 分钟或 5 分钟以下。

可通过 SPI 命令手动开启两个校准环。要开始校准,须将设备至于 PLL_ON 状态中。

可通过设置 PLL_CF_START=1 (寄存器 0x1A,PLL_CF) 开启中心频率校准。中心频率校准生成 (若启用) 一个 PLL_UNLOCK 中断。当 PLL_LOCK 中断 (若启用) 发生时,校准环完成。中心频率校准环的持续时间取决于当前 CF 值和最终 CF 值之间的差异。在校准过程中,CF 值会上升和下降。每步耗时 $8\ \mu\text{s}$ 。时间最小值为 $8\ \mu\text{s}$,时间最大值为 $270\ \mu\text{s}$ 。建议通过读取寄存器 0x1A(PLL_CF),将寄存器 PLL_CF_START 位设置为 1 开始中心频率校准,并返回寄存器写入值。

可通过将寄存器 0x1B(PLL_DCU)的 PLL_DCU_START 位设置为 1 开始延时元件校准。将可编程延时单元的延时时间调节至正确值。校准采用逐次近似算法进行,与寄存器 0x1B(PLL_DCU)的赋值无关。校准持续时间为 $10\ \mu\text{s}$ 。

在两个校准过程中,不能进行任何正确的接收或发送操作。因此,建议在 PLL_ON 状态下进行校准,但接收和发送状态下未锁定校准。

可同时执行这两项校准。

7.8.5 中断处理

两种不同的中断指示 PLL 状态。IRQ_0(PLL_LOCK)指示 PLL 已锁定。IRQ_1(PLL_UNLOCK)中断指示未预料的解锁条件。PLL_LOCK 中断会自动清除之前的所有 PLL_UNLOCK 中断，反之亦然。

在下列情况下发生 PLL_LOCK 中断：

- 状态从 TRX_OFF 转换至 PLL_ON/RX_ON 状态
- 在状态 PLL_ON/RX_ON 中改变频率设置
- 手动开始的中心频率校准已完成

所有其他 PLL_LOCK 中断事件均指示 PLL 在先前发生解锁之后再次被锁定。

在下列情况下发生 PLL_UNLOCK 中断：

- 在 PLL_ON/(RX_ON)状态中手动开始中心频率校准
- 在 PLL_ON/RX_ON 状态中改变频率设置

PLL_LOCK 和 PLL_UNLOCK 会影响收发器的性能：

在 BUSY_TX 和 BUSY_TX_ARET 状态下，会终止发送并使收发器返回 PLL_ON 状态。在 BUSY_RX 和 BUSY_RX_AACK 的状态下，在 PLL 被锁定之后，收发器分别返回 RX_ON 和 RX_AACK_ON 状态。

7.8.6 寄存器说明

寄存器 0x08 (PHY_CC_CCA)：

寄存器 PHY_CC_CCA 含有依 IEEE802.15.4 标准为欧洲和北美频段设置的信道中心频率的寄存器位。对寄存器 CHANNEL 位的写入访问用于设置寄存器位 CHANNEL 的信道数。读取访问显示当前信道数。必须将寄存器位 CC_BAND (寄存器 0x14, CC_CTRL_1) 设置为 0，以便激活上述信道选择，参看表 7-35。

表 7-36. 寄存器 0x08 (PHY_CC_CCA)

位	7	6	5	4
名称	CCA_REQUEST	CCA_MODE	CCA_MODE	CHANNEL[4]
读取/写入	W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	1	0
位	3	2	1	0
名称	CHANNEL[3]	CHANNEL[2]	CHANNEL[1]	CHANNEL[0]
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	1	0	1

表 7-37. IEEE802.15.4 标准信道分配列表

寄存器位	值	信道数 k	频率[MHz]
CHANNEL	0x00	0	868.3
	0x01	1	906
	0x02	2	908

寄存器位	值	信道数 k	频率[MHz]
	0x03	3	910
	0x04	4	912
	0x05	5	914
	0x06	6	916
	0x07	7	918
	0x08	8	920
	0x09	9	922
	0x0A	10	924
	0x0B...0x0F	预留	

寄存器 0x13 (CC_CTRL_0) :

此寄存器在不使用按信道数选择的情况下，控制频率选择。

表 7-38. 寄存器 0x13 (CC_CTRL_0)

位	7	6	5	4	3	2	1	0
名称	CC_NUMBER[7:0]							
读取/写入	R/W							
复位值	0	0	0	0	0	0	0	0

寄存器 0x14 (CC_CTRL_1) :

此寄存器选择频率范围。

表 7-39. 寄存器 0x14 (CC_CTRL_1)

位	7	6	5	4
名称	预留	预留	预留	预留
读取/写入	R	R	R	R
复位值	0	0	0	0
位	3	2	1	0
名称	预留	CC_BAND[2]	CC_BAND[1]	CC_BAND[0]
读取/写入	R	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0

寄存器 CC_CTRL_0 和 CC_CTRL_1 的功能介绍见于表 7-35。

寄存器 0x1A(PLL_CF):

此寄存器控制中心频率校准环的操作。

表 7-40. 寄存器 0x1A(PLL_CF)

位	7	6	5	4
名称	PLL_CF_START	预留	预留	PLL_CF[4]
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	1	0	0
位	3	2	1	0
名称	PLL_CF[3]	PLL_CF[2]	PLL_CF[1]	PLL_CF[0]
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	1	0	0	0

• 第 7 位-PLL_CF_START

PLL_CF_START=1 开启中心频率校准。在校准周期在 25 μs 内结束，而寄存器 PLL_CF_START 位复位为 0。

• 6: 5 位

这些寄存器位为预留位，必须总通过复位值将写入返回。

• 4: 0 位-PLL_CF

4: 0 位表示 PLL 的当前 CF 状态。为了保证尽可能缩短校准时间，不应在启动中心频率校准时改变其设置。

寄存器 0x1B(PLL_DCU):

此寄存器控制延时元件校准环的操作:

表 7-40. 寄存器 0x1B(PLL_DCU)

位	7	6	5	4
名称	PLL_DCU_START	预留	预留	预留
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	1	0	0
位	3	2	1	0
名称	预留	预留	预留	预留
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0

• 第 7 位-PLL_DCU_START

PLL_DCU_START=1 开始延时元件校准。校准周期在 10 μs 后结束，而寄存器 PLL_DCU_START 位复位为 0。校准完成后，寄存器位立即清空。

• 6:0 位-预留

7.9 自动滤波器调整 (FTN)

7.9.1 概览

安装 FTN 以便补偿无线电收发器的温度、电源电压变化和元件间差异。当从睡眠，复位或 P_ON 状态进入 TRX_OFF 状态时，会自动启动校准。

尽管接收器和发送器的抗变差稳定性非常强，仍建议在无线电收发器不定期使用睡眠模式时，手动启动 FTN。此校准特别适用于对变差灵敏度较高的高数据传输速率模式。建议校准间隔期为 5 分钟左右。

7.9.2 寄存器说明

寄存器 0x18(FTN_CTRL):

此寄存器控制滤波器调整校准环。

表 7-41. 寄存器 0x18(FTN_CTRL)

位	7	6	5	4
名称	FTN_START	预留	预留	预留
读取/写入	S	R/W	R/W	R/W
复位值	0	1	0	1
位	3	2	1	0
名称	预留	预留	预留	预留
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	1	0	0	0

• 第 7 位-FTN_START

FTN_START=1 开始滤波器调整校准环。在不超过 25 μ s (最大值) 的校准周期完成之后，寄存器位自动复位为 0。

• 6: 0 位-预留

8. 无线电收发器的使用

本章介绍了使用 AT86RF212 接收和发送帧的基本程序。

8.1 帧接收程序

帧接收由两个动作组成：收发器收听，接收并解调帧于帧缓冲并向微控制器发送接收信号。在此过程之中及之后，微控制器可通过 SPI 接口读取帧缓冲的可用帧数据。

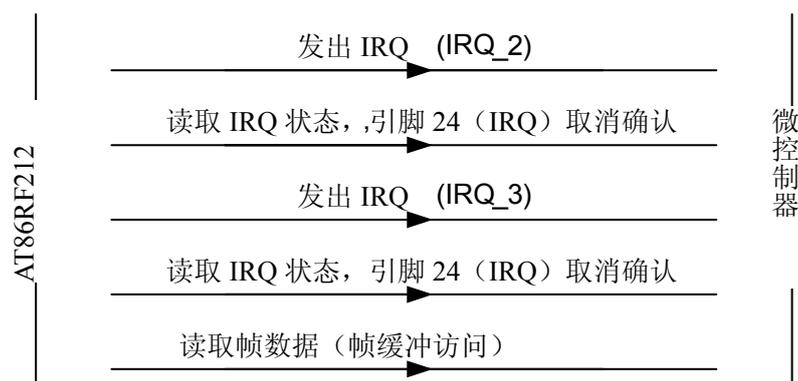
当处于 RX_ON 或 RX_AACK_ON 状态时，无线电收发器在所选信道搜索输入帧。假设已启用适当的中断时，中断 IRQ_2(RX_START)指示找到 IEEE802.15.4-2006 合规帧。当帧接收完成时，发出中断 IRQ_3(TRX_END)。

不同的帧缓冲读取访问情景建议用于：

- 非严格时间要求应用 在 IRQ_3(TRX_END)后开始读取访问
- 严格时间要求应用 在 IRQ_2(RX_START)后开始读取访问

对于非严格时间要求应用，建议在中断 IRQ_3(TRX_END)之后，再开始帧缓冲读取访问。图 8-1 列出了使用 IRQ_3(TRX_END)的帧接收程序。

图 8-1 AT86RF212 与微控制器之间的接收处理



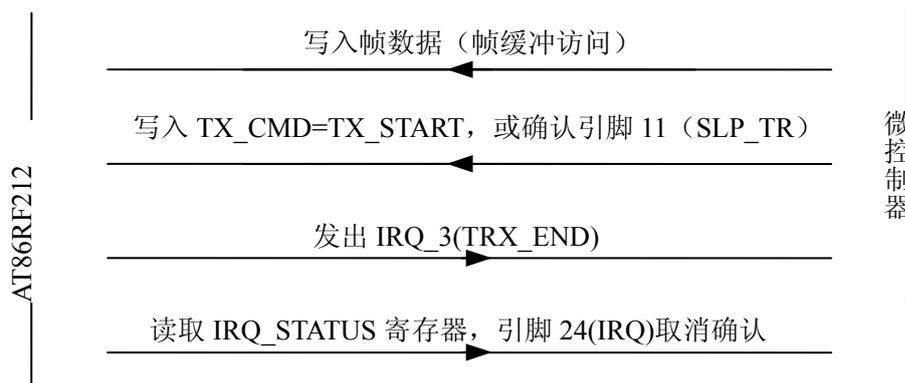
严格时间要求的协议可能要求在 IRQ_2 (RX_START) 之后开始帧缓冲的读取访问。在 IRQ_2 (RX_START) 中断 1 octet 时间周期过后，可读取帧数据的首字节。微控制器须保证读取慢于帧接收。否则，将发生帧缓冲欠载工作，发出 IRQ_6(TRX_UR)，而且还可能造成帧数据无效。为了避免这种情况，可使用帧缓冲空闲指示控制帧缓冲读取访问，参看 9.6 小节。

8.2 帧发送程序

帧发送由两个动作组成：帧缓冲写入访问和帧缓冲内容发送。如果时间要求严格的协议要求，可并行运行这两个动作。

图 8-2 列出先后执行写入和帧发送时的帧发送程序。在帧缓冲写入访问之后，当无线电收发器处于 PLL_ON 或 TX_ARET_ON 时，可通过确定引脚 11 (SLP_TR) 或在寄存器 0x02 (TRX_STATE) 写入 TX_START 命令开始帧发送。中断 IRQ_3(TRX_END) 指示处理完成。

图 8-2 AT86RF212 与微控制器之间的发送处理



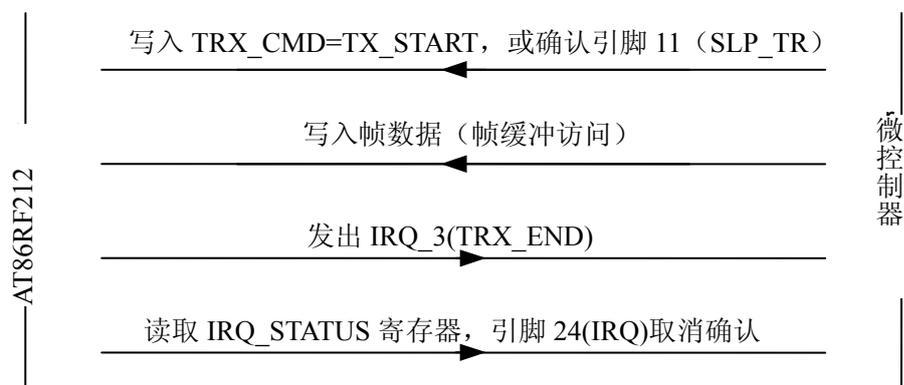
或者，可先开始帧发送，在对帧缓冲进行写入访问 (PSDU 数据)；参看图 8-3。这适用于对时间要求严格的应用。

可通过确认引脚 11 (SLP_TR) 或在寄存器 TRX_CMD 位 (寄存器 0x02, TRX_STATE) 写入 TX_START 命令开始发送，无线电收发器开始发送内部生成的 SHR。

PLL 建立和 PA 上斜坡的前端初始化需要 1 个符号周期。BPSK 下的 SHR 发送须另外 40 个符号周期，O-QPSK 需 10 个符号周期。

必须在时间用尽之前，在帧缓冲内提供可用 PHR。而且，SPI 数据传输速率必须高于寄存器 OQPSK_DATA_RATE 位 (寄存器 0x0C, TRX_CTRL_2) 选择的 PHY 数据传输速率以避免帧缓冲欠载工作，IRQ_6(TRX_UR) 用于指示欠载工作，参看 7.1.4 小节。

图 8-3 优化时序帧发送程序



9. 扩展功能设置

9.1 安全模块 (AES)

安全模块 (AES) 的特性包括:

- 硬件快速加密与解密
- 可兼容 AES-128 标准 (128 位密钥及数据块大小)
- ECB (加密/解密) 模式与 CBC (加密) 模式支持
- 独立操作, 独立于其他模块

9.1.1 概览

安全模块是符合 FIPS197 标准要求的基于 AES-128 的内核, 参看[7]。安全模块独立于 AT86RF212 的其他集成电路模块。可在帧发送或接收的同时执行加密和解密。

通过对地址空间 0x82 至 0x94 的 SRAM 访问实施对安全模块的控制。可在快速 SRAM 访问模式中, 在同一个 SPI 传输中同时写入新数据和读取先前处理的数据。此访问程序用于降低 ECB 模式的周转周期, 见 9.1.5。

此外, 安全模式含有另一个 128 位寄存器用于存储安全操作的初始密钥。安全模块不能修改此初始密钥。

9.1.2 安全模块准备

要使用安全模块, 则须在开始安全操作之前进行安全引擎配置。表 9-1 列出了所需的配置步骤。

表 9-1. AES 引擎配置步骤

步骤	描述	说明	章节
1	密钥设置	在 SRAM 写入加密或解密密钥	9.1.3
2	AES 模式	选择 AES 模式: ECB 或 CBC 选择加密或解密	9.1.4.1 9.1.4.2
3	写入数据	在 SRAM 写入明文文本或密码文本	9.1.5
4	开始操作	开始 AES 操作	
5	读取数据	读取 SRAM 密码文本或明文文本	9.1.5

在开始任何安全操作之前, 都必须在安全引擎写入密钥, 参看 9.1.3 小节。密钥设置须通过寄存器 AES_MODE 位 (SRAM 地址 0x83, AES_CTRL) 进行 AES 引擎密钥模式配置。

接下来的步骤是选择 AES 模式, 可为电子代码本 (ECB) 或密码分组链接 (CBC)。有关上述模式的详细信息将在 9.1.4 小节进行介绍。此外, 必须通过寄存器 AES_DIR 位 (SRAM 地址 0x83, AES_CTRL) 选择加密或解密。

然后, 须向 AES 硬件引擎发送 128 位明文文本或密码文本数据。数据占用的 SRAM 地址范围在 0x84-0x93 之间。

通过设置寄存器位 AES_REQUEST=1 (SRAM 地址 0x83, AES_CTRL 或 1.1 版本 SRAM 地址 0x94, AES_CTRL_MIRROR), 开始加密或解密。

只能通过在 0x82 至 0x94 之间的地址空间进行 SRAM 读取和写入访问 AES 模块控制寄存器。在 AES 模式配置中，可将数据提供和开始解密或加密操作结合到一次 SRAM 中进行。

附注

- 安全模块操作无须其他寄存器访问
- 在 TRX_OFF 状态下使用 AES 要求在引脚 17 (CLKM) 上激活时钟，即寄存器位 CLKM_CTRL ≠ 0。详细信息参看 7.7.4 小节。
- 当无线电收发器处于睡眠状态中时，不能访问安全模块。
- 在睡眠状态和复位状态下，所有的安全模块配置，SRAM 内容和密 均被复位。
- 在 AES 操作过程中，读取或写入访问寄存器 0x83 (AES_CTRL) 将结束当前操作。

9.1.3 安全密 设置

通过设置寄存器位 AES_MODE=0x1(SRAM 地址 0x83, AES_CTRL) 准备开始密 设置。然后，必须在 SRAM 地址 0x84 至 0x93(寄存器 AES_KEY) 内写入 128 位密 。建议通过从地址 0x83 开始的一个 SRAM 访问，将寄存器 0x83 (AES_CTRL) 控制设置和 128 位密 传输结合在一起。

128 位密 和 128 位数据的地址空间在程序设置上是相同的。但是，二者使用的页面不同，这是在数据存储前由寄存器 AES_MODE 位选择的。

寄存器 AES_KEY(0x84-0x93) 的读取访问返回先前安全操作的上一轮密 。在 ECB 加密操作之后，这是相应 ECB 解密操作所需的密 。但是，在 AES 操作过程中，不会对在 AES 运行之间已经写入安全模块的初始 AES 密 进行修改（见表 9-1，第一步）。虽然无法从 AES_KEY 读取该初始密 ，但该密 将用于下一次 AES 运行。

附注

- IEEE802.15.4 标准或 ZigBee 安全处理均不要求 ECB 解密。AT86RF212 提供此操作性能作为一项附加功能。

9.1.4 安全操作模式

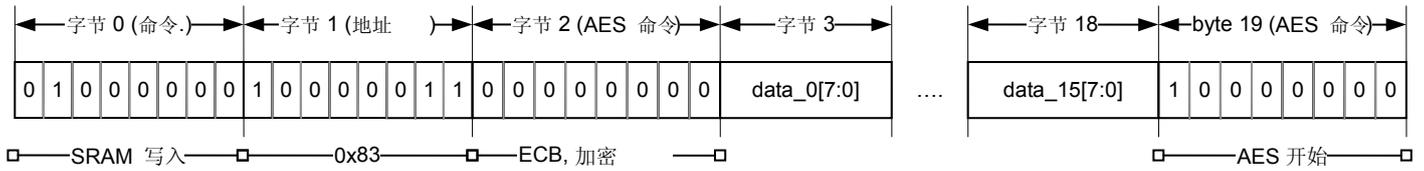
9.1.4.1 电子代码本 (ECB)

ECB 是安全模块的基本操作模式。在设置初始 AES 密 之后，寄存器位 AES_MODE=0(SRAM 地址 0x83, AES_CTRL) 将设置 ECB 模式。寄存器 AES_DIR 位(SRAM 地址 0x83, AES_CTRL) 选择方向(即，加密或解密)。须将待处理数据写入 SRAM 地址 0x84 至 0x93(寄存器 AES_STATE)。

编程时序示例见图 9-1。此示例假设之前已载入适当密 。

通过将开始命令 AES_REQUEST=1(寄存器 0x94, AES_CTRL_MIRROR) 附加至 SPI 时序，在一个 SRAM 地址内开始安全操作。寄存器 AES_CTRL_MIRROR 是寄存器 0x83 (AES_CTRL) 的版本。

图 9-1. ECB 编程 SPI 时序-加密



总之，要执行通过一个 SPI 地址执行安全操作，必须完成以下步骤：

- 1.配置 SPI 地址
 - a)SRAM 写入，参看 4.3 小节
 - b) 起始地址 0x83
- 2.配置 AES 操作
 - 地址 0x83:选择 ECB 模式，方向
- 3.写入 128 位数据块
 - 地址 0x84-0x93:可为明码文本或密码文本
- 4.开始 AES 操作
 - 地址 0x94:开始 AES 操作，ECB 模式

由于可在一个 SPI 处理中完成安全操作配置和启动，所以推荐使用此时序。

ECB 加密操作如图 9-2 所示。图 9-3 列出 ECB 解密模式，支持方式相同。

图 9-2 ECB 模式-加密

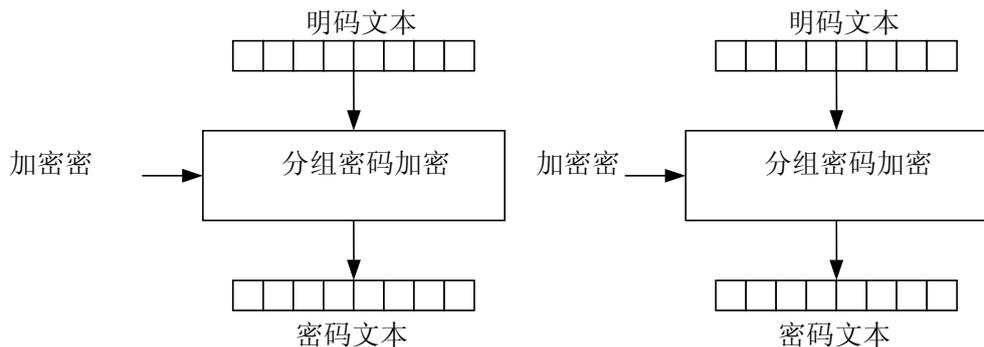
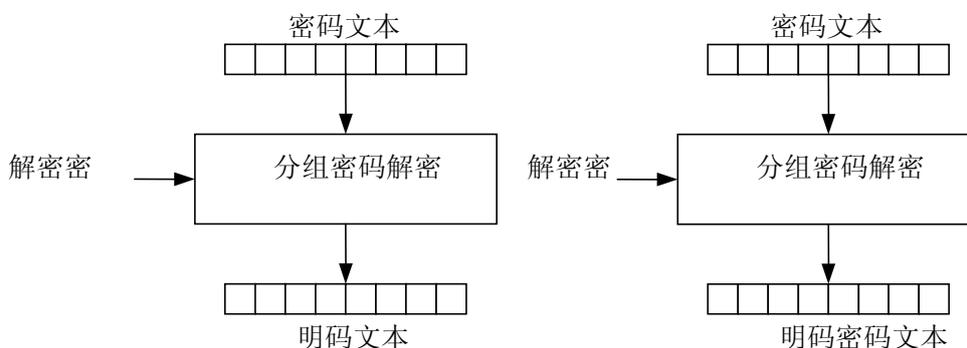


图 9-3 ECB 模式-解密



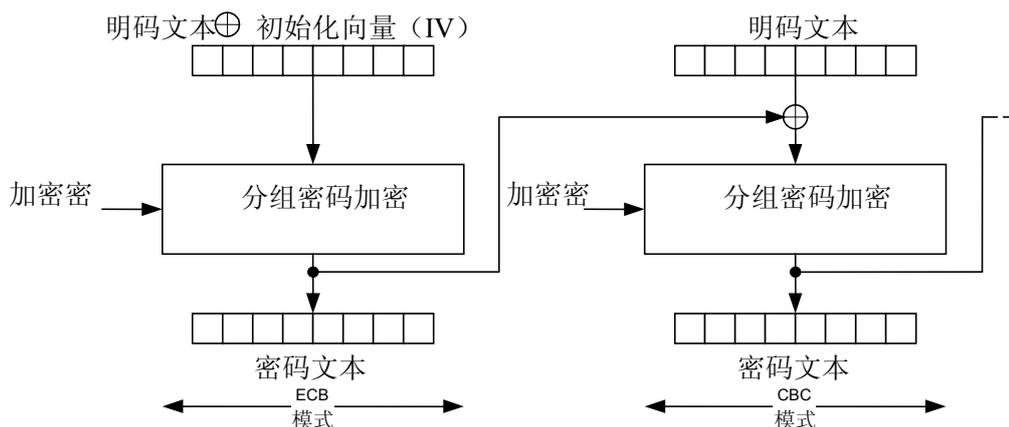
在解密过程中，由于 AES 算法的属性，使用的初始化密 不是加密初始密 ，而是上一轮的密 。上一轮加密密 是在运行过一个完整的加密周期后，在密 地址空间存储的内容，而且是解密要求必须保存的内容。如果未保存解密密 ，则须进行重新计算，也就是要——过先使用原始加密密 运行（任意明码文本的）假设加密，再从密 存储器中获得最后一轮密 ，并将其作为解密密 写回到密 存储器中。

IEEE802.15.4 标准或 ZigBee 帧安全标准均不使用 ECB 解密。这两种标准均不对有效载荷进行直接加密，而是对当前时间进行加密，并通过应用结果（AES-）密码文本和原始有效载荷之间的异或（XOR）运算保护有效载荷。由于加密和解密的当前时间相同，所以只须 ECB 加密。通过对接收的密码文本和其自身对应加密结果进行异或（XOR）运算，成功后，将产生原始明码文本有效载荷，即进行解密。

9.1.4.2 密码分组链接 (CBC)

在 CBC 模式中，通过将前一个 AES 操作结果与新输入向量进行异或（XOR）运算，形成新的加密密码文本，见图 9-4。此模式用于密码校验和运算（消息完整性码，MIC）。

图 9-4. CBC 模式-加密



在准备 AES 密 和使用 SRAM 寄存器 AES_DIR 位定义 AES 操作方向之后,须将数据输送至 AES 引擎并开始 CBC 操作。

必须将首次 CBC 运行设置为 ECB 以便处理初始数据 (明码文本与微控制器提供的初始化向量的异或 (XOR) 运算)。通过设置寄存器位 AES_MODE=0x2(寄存器 0x83, AES_CTRL)将后面的所有 AES 运行配置为 CBC。寄存器位 AES_DIR(寄存器 0x83, AES_CTRL)必须设置为 AES_DIR=0, 以便启动 AES 加密。须将要处理的数据传输至以 0x84 至 0x93 地址开头的 SRAM 中 (寄存器 AES_STATE)。如 9.1.4 小节所述,将寄存器位设置为 AES_REQUEST=1(寄存器 0x94, AES_CTRL_MIRROR)将在一个 SRAM 地址内开始初次加密。那么,后面的 128 为明码文本数据就必须与先前的密码文本数据进行异或 (XOR) 运算,见图 9-4。

按照 IEEE802.15.4 的规定,第一个 CBC 操作的输入来自为带有初始化向量 (IV) 的明码文本的异或 (XOR) 运算。初始化向量值为 0。但是,非合规用 可使用其他初始化向量。此操作由微控制器准备。

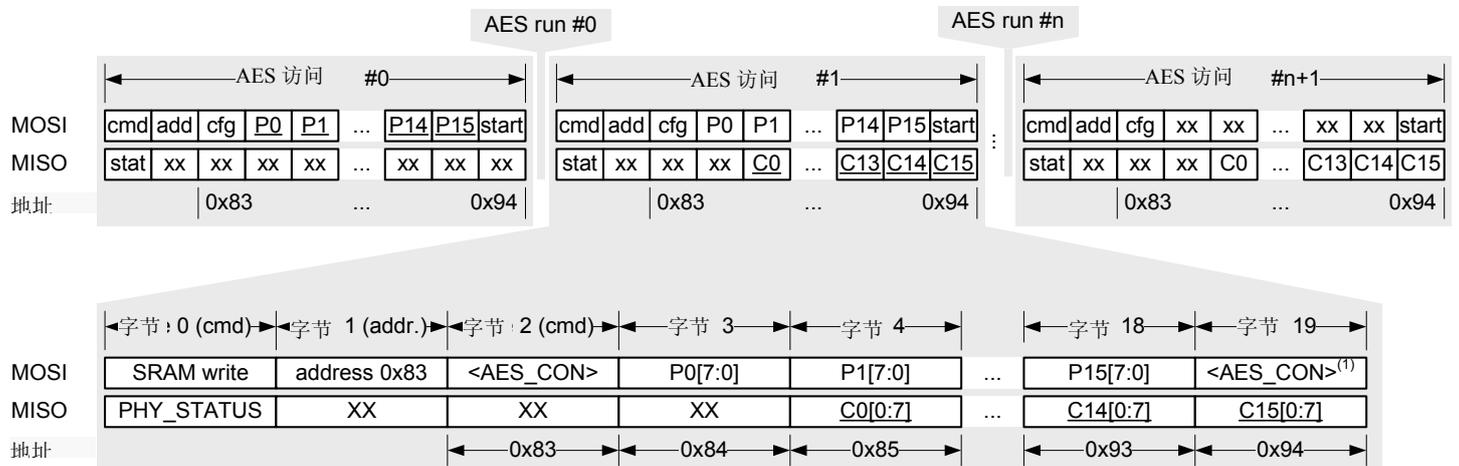
请注意由于 CBC 是一个单向 hash 数,所以 IEEE802.15.4-2006 标准的 MIC 算法只要求 CBC 模式加密。

9.1.5 数据传输-快速 SRAM 访问

ECB 和 CBC 模块,包括 AES 内 的时钟速率均为 16MHz。一个 AES 操作的执行耗时为 24 μs, 参看 10.4 小节,参数 10.4.15.这表示数据处理通常比通过 SPI 接口进行数据传输要快。

为了降低总处理时间,AT86RF212 为 0x83 至 0x94 之间的所有地址空间提供快速 SRAM 访问。

图 9-5. 数据包结构-快速 SRAM 访问模式



附注: 1.字节 19 为寄存器 AES_CTRL 在 SRAM 地址 0x94 上的 版本,详情参见寄存器说明 AES_CTRL_MIRROR。

可在 AES 连续操作 (AES 运行) 的 SPI 访问过程中,同时进行快速 SRAM 写入和读取访问。

在每个 P0 字节传输至引脚 22 (MOSI) 后, 相应 AES 寄存器 C0 的先前内容在引脚 20 (MISO) 上时序后移一个字节。可将图 9-5 作为一个“AES 访问#1”的示例进行参照。

在图 9-5 的示例中, 在“AES 访问#0”内, 初始明码文本 P0-P15 写入至 SRAM。地址 0x94 (AES_CTRL_MIRROR) 上最新的命令启动 AES 操作 (“AES 运行#0”)。在下一个“AES 访问#1”中, 新明码文本数据 P0-P15 写入 SRAM 以便进行第二轮 AES 运行, 同时, 第一轮 AES 运行的密码文本 C0-C15 也在引脚 MISO 的时序上向后移。为了读取上一次“AES 运行# (n)”的密码文本, 须执行 拟“AES 运行# (n+1)”。

请注意 SRAM 写入访问总覆盖先前处理的结果。

快速 SRAM 访问自动应用于 SRAM 地址 0x83 至 0x94 的所有写入操作。

9.1.6 安全操作状态

寄存器 0x82 (AES_STATUS) 指示安全处理的状态。在 24 μs 的 AES_DONE 处理时间之后, 寄存器 AES_RY 位变为 1 (寄存器 0x82, AES_STATUS), 说明安全操作已完成, 见 10.4 小节的参数 10.4.15。

9.1.7 SRAM 寄存器总结

下列寄存器为安全模块控制所需的寄存器:

表 9-2. SRAM 安全模块地址空间概览

SRAM 地址	寄存器名称	说明
0x80-0x81		预留
0x82	AES_STATUS	AES 状态
0x83	AES_CTRL	安全模块控制, AES 模式
0x84-0x93	AES_KEY AES_STATE	取决于 AES_MODE 设置: AES_MODE=1: -含有 AES_KEY (密) AES_MODE=0 2: -含 AES_STATE(128 位数据块)
0x94	AES_CTRL_MIRROR	寄存器 0x83(AES_CTRL)的
0x95-0xFF		预留

只能通过 SRAM 写入和读取访问这些寄存器, 详细信息请参看 4.3.3 节。请注意当进入睡眠状态时, SRAM 寄存器将被复位。

9.1.8 AES SRAM 配置寄存器

寄存器 0x82 (AES_STATUS)

此只读寄存器指示安全模块的状态和操作。

表 9-3. 寄存器 0x82 (AES_STATUS)

位	7	6	5	4
名称	AES_ER	预留	预留	预留
读取/写入	R	R	R	R
复位值	0	0	0	0

位	3	2	1	0
名称	预留	预留	预留	AES_DONE
读取/写入	R	R	R	R
复位值	0	0	0	0

• **第 7 位-AES_ER**

SRAM 寄存器位指示 AES 模块中的一个错误。错误可能是在访问 SRAM 寄存器 0x83(AES_CTRL) 之后暂时发生的，同时 AES 操作是在 SRAM 寄存器间隔 0x84-0x93 (AES_STATE) 读取不超过 128 位之后运行的。

表 9-4. AES 内 操作状态

寄存器位	值	说明
AES_ER	0	AES 模块无错误
	1	AES 模块错误

• **6: 1 位-预留**

• **第 0 位-AES_DONE**

表 9-5. AES 内 操作状态

寄存器位	值	说明
AES_DONE	0	AES 操作未完成
	1	AES 操作已完成

寄存器 0x83 (AES_CTRL) :

此寄存器控制安全模块的操作。在 AES 操作过程中发生的读取或写入访问会终止当前操作。

表 9-6. 寄存器 0x83 (AES_CTRL)

位	7	6	5	4
名称	AES_REQUEST	AES_MODE	AES_MODE	AES_MODE
读取/写入	W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0
位	3	2	1	0
名称	AES_DIR	预留	预留	预留
读取/写入	R/W	R	R	R
复位值	0	0	0	0

• **第 7 位-AES_REQUEST**

通过写入访问 AES_REQUEST=1 开始 AES 操作。

• **6: 4 位-AES_MODE**

此寄存器位设置 AES 操作模式。

表 9-7. AES 模式

寄存器位	值	说明
AES_MODE	0	ECB 模式, 参看 9.1.4.1
	1	KEY 模式, 参看 9.1.3
	2	CBC 模式, 参看 9.1.4.2
	3-7	预留

• 第 3 位-AES_DIR

此寄存器位设置 AES 操作方向, 是加密还是解密。

表 9-8. AES 方向

寄存器位	值	说明
AES_DIR	0	AES 加密 (ECB,CBC)
	1	AES 解密 (ECB)

• 1:0 位-预留

寄存器 0x84 (AES_CTRL_MIRROR):

寄存器 0x84 是寄存器 0x83 (AES_CTRL) 的 版本, 详细信息请参看寄存器 0x83 (AES_CTRL)。

表 9-9 寄存器 0x84 (AES_CTRL_MIRROR)

位	7	6	5	4
名称	AES_REQUEST	AES_MODE	AES_MODE	AES_MODE
读取/写入	W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0
位	3	2	1	0
名称	AES_DIR	预留	预留	预留
读取/写入	R/W	R	R	R
复位值	0	0	0	0

此寄存器可通过附加在数据流中并设置寄存器位 AES_REQUEST=1 用于在一次 SRAM 访问中开始安全操作。

9.2 随机数发生器

9.2.1 概览

AT86RF212 提供 2 位随机数发生器。此随机数可用于:

- 生成 CSMA-CA 算法的随机种子 见 5.2 小节
- 生成 AES 密 生成的随机值 见 9.1 小节

在基本操作模式的接收状态下, 随机数每 1 μ s 更新一次。该值保存在寄存器 RND_VALUE 位 (寄存器 0x06, PHY_RSSI)。

9.2.2 寄存器说明

寄存器 0x06 (PHY_RSSI):

寄存器 0x06 (PHY_RSSI) 是用于指示 FCS 有效性的多功能寄存器，可发出随机数和 RSSI 值。

表 9-10. 寄存器 0x06 (PHY_RSSI)

位	7	6	5	4
名称	RX_CRC_VALID	RND_VALUE	RND_VALUE	RSSI
读取/写入	R	R	R	R
复位值	0	0	0	0
位	3	2	1	0
名称	RSSI	RSSI	RSSI	RSSI
读取/写入	R	R	R	R
复位值	0	0	0	0

- **第 7 位-RX_CRC_VALID**

参看 6.3.5 小节中的寄存器说明。

- **6: 5 位-RND_VALUE**

可通过读取寄存器 RND_VALUE 位获取 2 位随机数。请注意无线电收发器应处于基本操作模式的接收状态。此值每 1 μ s 更新一次。

- **4: 0 位-RSSI**

参看 6.4.4 小节中的寄存器说明。

9.3 可支持基于MAC天线分集的差分输出

数字输出引脚 DIG1 与 DIG2 可用于驱动通用差分信号。以下各章将向 介绍其可实现应用之一——即，基于 MAC 的天线分集。

9.3.1 概览

由于各网络节点间的多径传播效应，接收信号强度可能出现变化并影响链路质量，即使是很小的天线定位变化，也是如此。此类 效应会导致错误平 上升或设备间连接损耗。

为了改善网络节点之间的 RF 连接可靠性，可使用天线分集减少多径传播与 效应。天线分集使用两个天线选择最可靠的 RF 天线路径。为了保证两天线之间接收信号高度独立，应非常注意将天线相互分开。

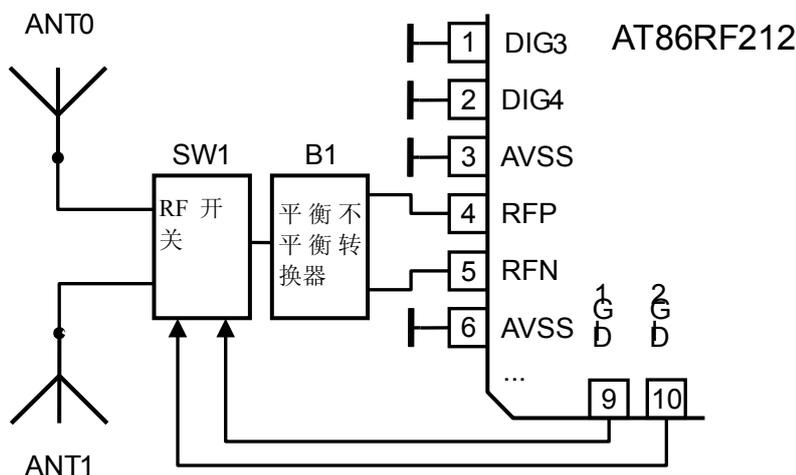
AT86RF212 支持基于 MAC 的天线分集，即微控制器控制用于发送和接收的天线，此操作由寄存器设置执行。

可在基本和扩展操作模式中使用天线分集，也可将天线分集与 如高数据传输速率模式及 RX/TX 指示等其他功能和操作模式结合使用。

9.3.2 应用示例

图 9-6 为典型应用的方 图。

图 9-6. 天线分集——方 图



若 ANT_EXT_SW_EN=1(寄存器 0x0D,ANT_DIV), 则天线分集引脚 9 和 10 (DIG1 和 DIG2) 被启用。在此情况下, 控制引脚 9 和 10 与数字接地端的内部连接失效 (参看 2.2.2 小节), 而且引脚会向天线开关 (SW1) 发出差分控制信号。

选择寄存器 ANT_CTRL 位 (寄存器 0x0D, ANT_DIV) 定义的天线进行发送和接收。

9.3.3 寄存器说明

寄存器 0x0D (ANT_DIV):

ANT_DIV 寄存器控制天线分集。

表 9-11. 寄存器 0x0D (ANT_DIV)

位	7	6	5	4
名称	预留	预留	预留	预留
读取/写入	R	R	R	R
复位值	0	0	0	0
位	3	2	1	0
名称	预留	ANT_EXT_SW_EN	ANT_CTRL	ANT_CTRL
读取/写入	R	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	1

• 7: 3 位-预留

• 第 2 位-ANT_EXT_SW_EN

若启用, 则引脚 9 (DIG1) 和引脚 10 (DIG2) 成为输出引脚, 并向天线分集开关发出差分控制信号。按照寄存器 ANT_CTRL 为选择指定天线。

若 RF 帧时间戳（参看 9.5 小节）与天线分集结合使用，DIG1 用于天线分集而 DIG2 用于 RF 帧时间戳。在此情况下，AT86RF212 不发出差分控制信号，见图 3-2。

若设置寄存器位，则只要设置寄存器 ANT_EXT_SW_EN 位，控制引脚 DIG1/DIG2 在所有无线电收发器状态下均被激活。如果 AT86RF212 不处于接收或发送状态，则建议关闭寄存器 ANT_EXT_SW_EN 位以降低功耗或避免外置 RF 开关泄露电流，特别是在睡眠状态下。若寄存器位 ANT_EXT_SW_EN=0，则输出引脚 DIG1 和 DIG2 内部连接至数字接地端。

表 9-12. 天线分集 RF 开关启用

寄存器位	值	说明
ANT_EXT_SW_EN	0	天线分集 RF 开关控制关闭
	1	天线分集 RF 控制开关打开

• 1: 0 位-ANT_CTRL

这些寄存器位发出天线分集开关静态控制。

表 9-14. 天线分集开关控制

寄存器位	值	说明
ANT_CTRL	0	预留
	1	天线 0 DIG1=L DIG2=H
	2	天线 1 DIG1=H DIG2=L
	3	预留

9.4 RX/TX指示器

主要特点为：

- RX/TX 指示器用于控制外置 RF 前端
- 微控制器独立于 RF 前端控制
- 提供 TX 时序信息

9.4.1 概览

当 IEEE802.15.4 对应低成本及低功率应用时，有时需要支持较高发送输出功率的解决方案。为了简化选配外置 RF 前端的控制，差分控制引脚对可指示 AT86RF212 目前处于发送模式中。

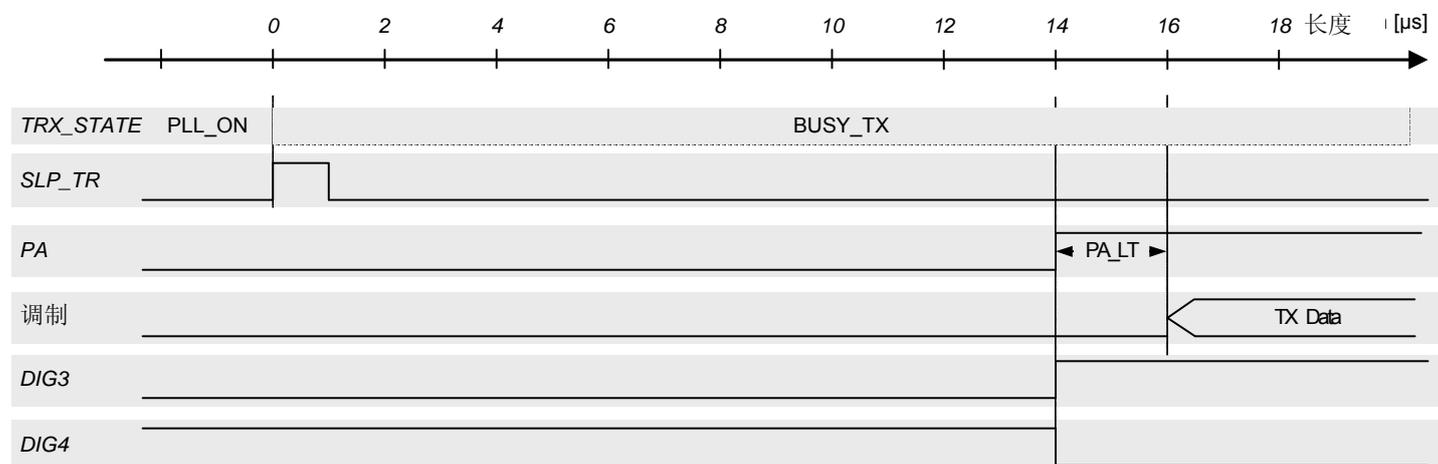
通过数字控制引脚 DIG3/DIG4 进行外置 RF 前端控制。寄存器 PA_EXT_EN 位（寄存器 0x04，TRX_CTRL_1）启动此引脚对的功能。当发生器关闭时，引脚 1 (DIG3) 设置为低电平而引脚 2 (DIG4) 设置为高电平。如果无线电收发器开始发送，二引脚的极性将发生转换。此差分引脚对可用于控制 PA、LNA 和 RF 开关。

若 AT86RF212 未处于接收或发送状态，建议关闭寄存器 PA_EXT_EN 对（寄存器 0x04，TRX_CTRL_1）以降低功耗或避免外置 RF 开关和其他集成块的泄露电流，特别是在睡眠状态下。如果寄存器位 PA_EXT_EN=0，输出引脚 DIG3/DIG4 内置连接至数字接地端。

9.4.2 外置 RF 前端控制

当使用带有功率放大器 (PA) 的外置 RF 前端时, 可能需要参照内置集成块调节外置 PA 的设置时间, 以便优化总功率谱密度 (PSD) 掩码。

图 9-8. 250 kbit/s O-QPSK 模式的 RF 前端 TX 功率斜坡控制



内置发生器独立集成块启动时序如图 9-8 所示, 实际上是通过引脚 11 (SLP_TR) 上升沿开始发送。无线电收发器状态由 PLL_ON 转换至 BUSY_TX, PLL 在 1 符号周期内建立为发送频率。调制在 SLP_TR 上升沿后 1 符号周期启动。在此时间内, 对内置 PA 进行初始化。通过差分引脚对 DIG3/DIG4 控制外置 PA。DIG3=H/DIG4=L 即开始发送并可用于启动外置 PA。可参照帧的启动, 通过寄存器 PA_LT 位 (寄存器 0x16, RF_CTRL_0) 调节引脚 DIG3/DIG4 的时序。详细情况参看 7.3.5 小节。

9.4.3 寄存器说明

寄存器 0x04 (TRX_CTRL_1) :

TRX_CTRL_1 寄存器是用于控制无线电收发器不同操作模式和设置的多功能寄存器。

表 9-15. 寄存器 0x04 (TRX_CTRL_1)

位	7	6	5	4
名称	PA_EXT_EN	IRQ_2_EXT_EN	TX_AUTO_CRC_ON	RX_BL_CTRL
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	1	0
位	3	2	1	0
名称	SPI_CMD_MODE	SPI_CMD_MODE	IRQ_MASK_MODE	IRQ_POLARITY
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0

• **第 7 位-PA_EXT_EN**

此寄存器位启动引脚 1（DIG3）和引脚 2（DIG4）以便指示无线电收发器的发送状态。

表 9-16. RF 前端控制引脚

PA_EXT_EN	状态	引脚	值	说明
0	不可用	DIG3	L	外置 RF 前端控制关闭
		DIG4	L	
1 ⁽¹⁾	BUSY_TX	DIG3	H	外置 RF 前端控制开启
		DIG4	L	
	其他	DIG3	L	
		DIG4	H	

附注：1. 建议只在接收或发送状态下设置 PA_EXT_EN=1，以便降低功耗或避免外置 RF 开关或其他集成块的泄露电流，特别是在睡眠模式中。

• **第 6 位—IRQ_2_EXT_EN**

参看 9.5 小节。

• **第 5 位-TX_AUTO_CRC_ON**

参看 6.3 小节。

• **第 4 位-RX_BL_CTRL**

参看 9.6 小节。

• **3: 2 位-SPI_CMD_MODE**

参看 4.4.1 小节。

• **第 1 位- IRQ_MASK_MODE**

参看 4.7 小节。

• **第 0 位-IRQ_POLARITY**

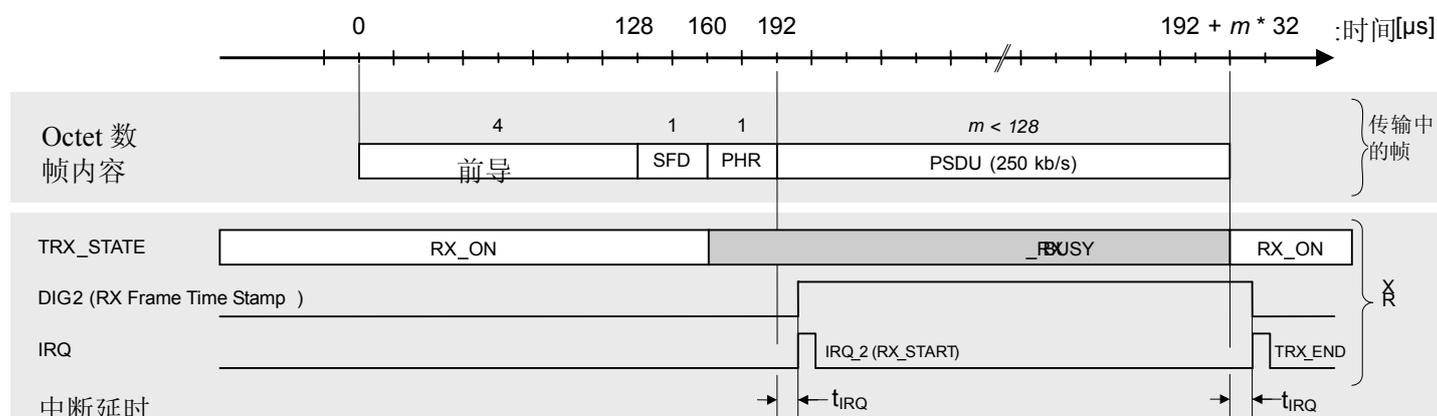
参看 4.7 小节。

9.5 RX帧时间戳

9.5.1 概览

为了确定输入帧的确切时序，如，在信标使能网络中，可通过引脚 10（DIG2）向微控制器发送帧接收信号。检测到有效 PHR 之后，引脚从 L 转换为 H。当启用时，DIG2 被设置为 DIG2=H，同时发出 IRQ_2(RX_START)，即使 IRQ_2 已关闭。在帧接收程序长度内，引脚保持高电平，见图 9-9。

图 9-9. 250 kbit/s O-QPSK 模式内 RX 帧时间戳的 RX_START 和 DIG2 时序



附注：时序图参看 10.4 小节。

通过寄存器 `IRQ_2_EXT_EN` 位（寄存器 `0x04`，`TRX_CTRL_1`）启动此功能。引脚 10（DIG2）可连接至微控制器的计时器 获单元。

如果此引脚不用于 RX 帧时间戳，可将其配置为天线分集，参看 9.3 小节。反之，则将其内部连接至接地端。

9.5.2 寄存器说明

寄存器 `0x04` (`TRX_CTRL_1`):

寄存器 `0x04` (`TRX_CTRL_1`) 是用于控制无线电收发器的不同操作模式和设置的多功能寄存器。

表 9-17. 寄存器 `0x04` (`TRX_CTRL_1`)

位	7	6	5	4
名称	<code>PA_EXT_EN</code>	<code>IRQ_2_EXT_EN</code>	<code>TX_AUTO_CRC_ON</code>	<code>RX_BL_CTRL</code>
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	1	0
位	3	2	1	0
名称	<code>SPI_CMD_MODE</code>	<code>SPI_CMD_MODE</code>	<code>IRQ_MASK_MODE</code>	<code>IRQ_POLARITY</code>
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0

• 第 7 位-`PA_EXT_EN`

参看 9.4 小节。

• 第 6 位-`IRQ_2_EXT_EN`

若设置此寄存器，则 RX 帧时间戳模式启动。带有有效 PHR 的输入帧通过引脚 10（DIG2）发出信号。引脚保持高电平直至帧接收程序结束，见图 9-9。

• 第 5 位-`TX_AUTO_CRC_ON`

参看 6.3 小节。

- **第 4 位-RX_BL_CTRL**
参看 9.6 小节。
- **3: 2 位-SPI_CMD_MODE**
参看 4.4.1 小节。
- **第 1 位-IRQ_MASK_MODE**
参看 4.7 小节
- **第 0 位-IRQ_POLARITY**
参看 4.7 小节。

9.6 帧缓冲空闲指示器

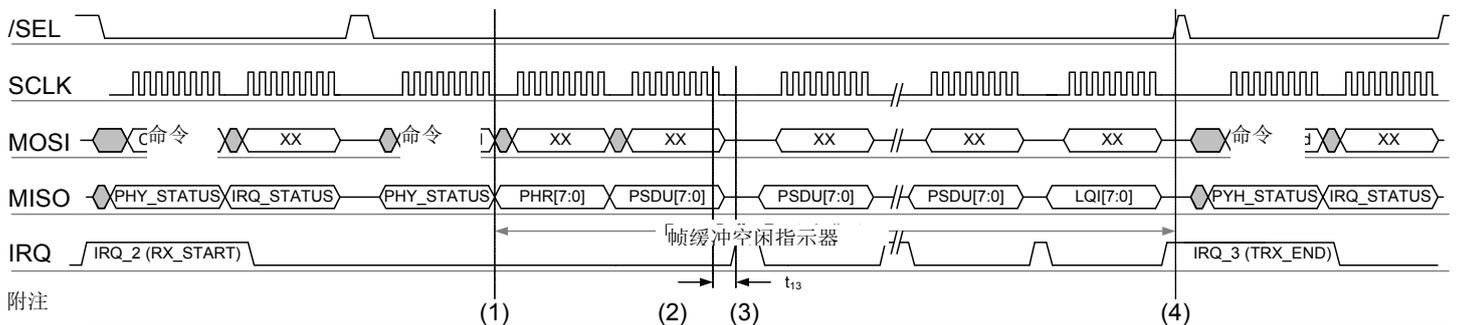
9.6.1 概览

对时间要求严格的应用可能需要尽早读取帧数据。为了完成此操作，可通过指定引脚向微控制器指示帧缓冲空闲状态。

在帧缓冲读取访问中，引脚 24 (IRQ) 可配置为帧缓冲空闲指示器。通过寄存器 RX_BL_CTRL 位 (寄存器 0x04, TRX_CTRL_1) 启动此模式。

如图 9-10 所示，在帧缓冲读取访问命令传输至 SPI bus 之后，引脚 24 从 IRQ 转换至帧缓冲空闲指示器，见图 9-10 (1)。当帧缓冲读取程序完成时 (/SEL=H)，引脚 24 返回其常规状态 IRQ，见 (4)。

图 9-10. 帧缓冲空闲指示器时序图。



在帧缓冲读取程序过程中，微控制器必须查看引脚 24。当引脚 24=L 时，可执行帧缓冲读取访问，见 (2)。引脚 24=H 指示帧缓冲目前未准备好另一个 SPI 周期，见 (3)，因此帧缓冲读取程序须执行相应的有效程序。

在帧缓冲读取命令字节最后一个 SCLK 时钟上升沿之后 $t_{13}=750$ ns，帧缓冲空闲指示器引脚 24 (IRQ) 变为有效。

当通过发送 /SE 命令完成帧缓冲器读访问后 参看 (4)，引脚 IRQ 将立即指示延迟中断。

如果在帧缓冲读取访问的过程中，发生接收错误 (如，PLL 解锁)，那么帧缓冲指示器也会锁定为 ‘空闲’ (引脚 24=H)。为了避免可能发生的死锁，微控制器应使用暂停计时器，校验帧缓冲空闲指示器在 2 octet 周期后仍处于逻辑高。新字节必须在此周期内到达帧缓冲。反之，帧缓冲读取访问失败。

9.6.2 寄存器说明

寄存器 0x04(TRX_CTRL_1):

寄存器 TRX_CTRL_1 是用于控制无线电收发器不同操作模式和设置的多功能寄存器。

表 9-18. 寄存器 0x04(TRX_CTRL_1)

位	7	6	5	4
名称	PA_EXT_EN	IRQ_2_EXT_EN	TX_AUTO_CRC_ON	RX_BL_CTRL
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	1	0
位	3	2	1	0
名称	SPI_CMD_MODE	SPI_CMD_MODE	IRQ_MASK_MODE	IRQ_POLARITY
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0

- **第 7 位-PA_EXT_EN**

参看 9.4 小节。

- **第 6 位-IRQ_2_EXT_EN**

参看 9.5 小节。

- **第 5 位-TX_AUTO_CRC_ON**

参看 6.3 小节。

- **第 4 位-RX_BL_CTRL**

若设置此寄存器位，帧缓冲空闲指示器启用。在发送帧缓冲读取命令之后，（见 4.3 小节）引脚 24（IRQ）指示由于 PSDU 数据尚不可用，所以不能访问帧缓冲。在此期间引脚 24（IRQ）不指示任何中断。

表 9-19. 帧缓冲空闲指示器

寄存器位	值	说明
RX_BL_CTRL	0	帧缓冲空闲指示器关闭
	1	帧缓冲空闲指示器开启

- **3: 2 位-SPI_CMD_MODE**

参看 4.4.1 小节。

- **第 1 位-IRQ_MASK_MODE**

参看 4.7 小节。

- **第 0 位-IRQ_POLARITY**

参看 4.7 小节。

9.7 动态帧缓冲保护

9.7.1 概览

只要 AT86RF212 处于任意接收专题中，即可继续接收输入帧。当成功接收帧并存储至帧缓冲时，下一个帧会再覆盖帧缓冲内容。

为了缓解帧缓冲读取访问的时序要求，只要帧缓冲读取访问为完成（/SEL=H），动态帧缓冲保护就会可避免新输入帧覆盖帧缓冲，参看 4.3 小节。

接收帧会自动防止覆盖，如果：

- 在基本操作模式下，FCS 有效
- 在扩展操作模式下，生成 IRQ_3(TRX_END)

如果设置了寄存器 RX_SAFE_MODE 位（寄存器 0x0C，TRX_CTRL_2）。且收发器状态为 RX_ON 或 RX_AACK_ON，则启动动态帧缓冲保护。

请注意动态帧缓冲保护只能避免无线接口的写入访问-而非来自 SPI 接口的写入访问。帧缓冲或 SRAM 写入访问仍可能修改帧缓冲内容。

9.7.2 寄存器说明

寄存器 0x0C(TRX_CTRL_2):

寄存器 TRX_CTRL_2 是用于控制无线电收发器不同设置的多功能寄存器。

表 9-20. 寄存器 0x0C(TRX_CTRL_2)

位	7	6	5	4
名称	RX_SAFE_MODE	TRX_OFF_AVDD_EN	OQPSK_SCRAM_EN	OQPSK_SUB1_RC_EN
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	1	0
位	3	2	1	0
名称	BPSK_OQPSK	SUB_MODE	OQPSK_DATA_RATE	OQPSK_DATA_RATE
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0

• 第 7 位-RX_SAFE_MODE

若设置此位，则动态帧缓冲保护被启用。

表 9-21. 动态帧缓冲保护模式

寄存器位	值	说明
RX_SAFE_MODE ⁽¹⁾	0	关闭动态帧缓冲保护
	1	打开动态帧缓冲保护

附注： 1. 如果通过帧缓冲读取访问的引脚 23（/SEL）上升沿（见 4.3.2 小节），或将无线电收发器状态由 RX_ON 或 RX_AACK_ON 转换为其他状态，则反激活动态帧缓冲保护。

- **第 6 位-TRX_OFF_AVDD_EN**

参看 5.1.4.3 小节。

- **第 5 位- OQPSK_SCRAM_EN**

参看 7.1.5 小节。

- **第 4 位- OQPSK_SUB1_RC_EN**

参看 7.1.5 小节。

- **第 3 位-BPSK_OQPSK**

参看 7.1.5 小节。

- **第 2 位-SUB_MODE**

参看 7.1.5 小节。

- **1: 0 位-OQPSK_DATA_RATE**

参看 7.1.5。

9.8 可配置帧起始定界符 (SFD)

9.8.1 概览

SFD 是用于指示 SHR 结束和包数据开始的字段。SFD 长度为 1octet(BPSK 调制为 8 符号, O-QPSK 调制为 2 符号)。此 octet 只用于字节同步, 不包含在帧缓冲中。

如果需要操作非 IEEE802.15.4 标准合规网络, 那么可以改变 SFD 值。IEEE802.15.4 合规网络节点不与带有不同 SFD 值的帧同步。

于 SHR 形成的方式, 不建议将后 4 位设置为 0。

9.8.2 寄存器说明

寄存器 0x0B(SFD_VALUE)

此寄存器含有 1octet 用于与接收帧同步的帧起始定界符 (SFD)。

表 9-21. 寄存器 0x0B(SFD_VALUE)

位	7	6	5	4	3	2	1	0
名称	SFD_VALUE[7:0]							
读取/写入	R/W							
复位值	1	0	1	0	0	1	1	1

- **7: 0 位-SFD_VALUE**

对于 IEEE802.15.4 标准的合规网络, 应设置 SFD_VALUE=0xA7 (见[1]规定)。此为寄存器默认值。

为了建立非 IEEE802.15.4 标准合规网络, 可将 SFD 值改为任意其他值。若启用此设置, 则只在接收 SFD 与 SFD_VALUE 匹配且接收到有效 PHR 时, 发出 IRQ_2(RX_START)。

10. 电 特性

10.1 绝对最大定 值

附注：超过“绝对最大定 值”所列的应 可能导致设备 损 。这仅为应 定 值，不表示在此值或其他超过在操作章节中所述值的情况下进行设备功能操作。长时期处于绝对最大定 值可能影响设备的可靠性。

编号	符号	参数	条件	最小值	标准值	最大值	单位
10.1.1	T _{STOR}	存储温度		-50		150	°C
10.1.2	T _{LEAD}	引脚焊 温度	T=10s 焊 特性符合 IPC/JEDEC J-STD-020B			260	°C
10.1.3	V _{ESD}	ESD 稳 性	符合[5] 符合[6]	4 750			kV V
10.1.4	P _{RF}	输入 RF 电平				10	dBm
10.1.5	V _{DIG}	各引脚电压，引脚 4, 5, 13, 14, 29 除外		-0.3		V _{DD} +0.3 ≤ 4.0	V
10.1.6	V _{ANA}	引脚 4, 5, 13, 14, 29 电压		-0.3		2	V

10.2 操作范围

编号	符号	参数	条件	最小值	标准值	最大值	单位
10.2.1	T _{CP}	操作温度范围		-40		85	°C
10.2.2	V _{DD}	电源电压	引脚 15, 28 ⁽²⁾ 电压	1.8	3.0	3.6	V
10.2.3	V _{DD1.8}	电源电压	引脚 13, 14, 29 外置电 源电压 ^{(1) (2)}	1.7	1.8	1.9	V

附注：1. 即使执行使用 1.8V 外置电源 V_{DD1.8}，则须将其与 V_{DD} 连接。

2. 寄存器 0x10 (VREG_CTRL) 须设置为关闭内部电压调节器及电源块，参看 7.5 小节。

10.3 数字引脚规格

测试条件: T_{OP}=25 °C

编号	符号	参数	条件	最小值	标准值	最大值	单位
10.3.1	V _{IH}	高电平输入电压 ⁽¹⁾		V _{DD} -0.4			V
10.3.2	V _{IL}	低电平输入电压 ⁽¹⁾				0.4	V
10.3.3	V _{OH}	高电平输出电压 ⁽¹⁾	对于所有在 TRX_CTRL_0 中设 定的输出驱动强度	V _{DD} -0.4			V
10.3.4	V _{OL}	低电平输出电压 ⁽¹⁾	对于所有在 TRX_CTRL_0 中设 定的输出驱动强度			0.4	V

附注：1. 当使用默认启动强度设置时，所有 I/O 的容性负载不应大于 50pF，参看 2.2.2.1 小节。通常，大负载电容会提高总耗电量。

10.4 数字接口时序特性

测试条件: $T_{OP}=25^{\circ}C$, $V_{DD}=3.0V$, $C_L=50pF$

编号	符号	参数	条件	最小值	标准值	最大值	单位
10.4.1	f_{sync}	SCLK 频率	同步操作			8	MHz
10.4.2	f_{async}	SCLK 频率	异步操作			7.5	MHz
10.4.3	t_1	/SEL 下降沿至 MISO 启用				180 ⁽⁷⁾	ns
10.4.4	t_2	SCLK 下降沿至 MISO 关闭	数据保持时间	25 ⁽⁷⁾			ns
10.4.5	t_3	MOSI 建立时间		10 ⁽⁷⁾			ns
10.4.6	t_4	MOSI 保持时间		10 ⁽⁷⁾			ns
10.4.7	t_5	LSB 字节到 MSB 次字节		250 ⁽⁸⁾			ns
10.4.8	t_6	/SEL 上升沿至 MISO tri 状态				10 ⁽⁸⁾	ns
10.4.9	t_7	SLP_TR 脉冲宽度	TX 启动触发	62.5		Note ⁽¹⁾	ns
10.4.10	t_8	SPI 空闲时间: SEL 上升至下降沿	SPI 读取/写入, 标准 SRAM 及帧访问模式; 连续 SPI 访问之间的空闲时间	250 ⁽⁸⁾			ns
10.4.11	t_8	SPI 空闲时间: SEL 上升至下降沿	快速 SRAM 读取/写入访问模式, 参看 9.1.5 小节; 连续 SPI 访问之间的空闲时间	500 ⁽⁸⁾			ns
10.4.12	t_9	SCLK 上升沿 LSB 至 /SEL 上升沿			250 ⁽⁸⁾		ns
10.4.13	t_{10}	复位脉冲宽度	10 时钟周期 (16MHz)	625			ns
10.4.14	t_{11}	SPI 复位后访问延时	10 时钟周期 (16MHz)	625			ns
10.4.15	t_{12}	AES 内 周期时间			24		μs
10.4.16	t_{13}	动态帧缓存器保护: IRQ 延期			750		ns
10.4.17	f_{CLKM}	引脚 17 (CLKM) 控制器时钟频率	可通过寄存器 0x03 (TRX_CTRL_0) 进行程序设置		0 ⁽²⁾ 1 ⁽²⁾ 2 ⁽²⁾ 4 ⁽²⁾ 8 ⁽²⁾ 16 ⁽²⁾ 1/4 ⁽²⁾ 1/50 ⁽³⁾ 1/25 ⁽⁴⁾ 1/40 ⁽⁵⁾ 1/16 ⁽⁶⁾		MHz MHz MHz MHz MHz MHz MHz MHz MHz MHz
10.4.18	t_{IRQ}	IRQ_2,IRQ_3,IRQ_4 延时	相对于要指示的事件		9 ⁽⁹⁾		μs

- 附注： 1.最大脉冲宽度小于（TX 帧长度+16 μ s）
 2.所有模式
 3.仅限 BPSK 模式，且 $f_{\text{PSDU}}=20\text{kbit/s}$
 4.仅限 BPSK 模式，且 $f_{\text{PSDU}}=40\text{kbit/s}$
 5.仅限 O-QPSK 模式，且 $f_{\text{PSDU}}=100/200/400\text{kbit/s}$
 6.仅限 O-QPSK 模式，且 $f_{\text{PSDU}}=250/500/1000\text{kbit/s}$
 7.见图 4-3
 8.见图 4-2
 9.见图 5-2
 10.如需在地址间隔 0x82-0x94 之间进行快速 SRAM 读取访问，请将时间 t_5 (分钟)提高至 450ns。

10.5 收发器基本规格

测试条件： $T_{\text{OP}}=25^{\circ}\text{C}$, $V_{\text{DD}}=3.0\text{V}$

编号	符号	参数	条件	最小值	标准值	最大值	单位
10.5.1	f_{RF}	射频范围	间隔 1.0MHz 间隔 0.1MHz 间隔 0.1MHz 间隔 0.1MHz	769 769 857 903		935 794.5 882.5 928.5	MHz MHz MHz MHz
10.5.2	f_{CHIP}	码片速率	BPSK,如[1]中所规定 BPSK,如[1]中所规定 O-QPSK,如[1]中所规定 O-QPSK,如[1]中所规定		300 600 400 1000		kchip/s kchip/s kchip/s kchip/s
10.5.3	f_{HDR}	标头比特率 (SHR,PHR)	BPSK,如[1]中所规定 BPSK,如[1]中所规定 O-QPSK,如[1]中所规定 O-QPSK,如[1]中所规定		20 40 100 250		kbit/s kbit/s kbit/s kbit/s
10.5.4	f_{PSDU}	PSDU 比特率	BPSK,如[1]中所规定 BPSK,如[1]中所规定 O-QPSK,如[1]中所规定 O-QPSK,如[1]中所规定 O-QPSK O-QPSK O-QPSK O-QPSK		20 40 100 250 200 400 500 1000		kbit/s kbit/s kbit/s kbit/s kbit/s kbit/s kbit/s kbit/s
10.5.5	f_{CLK}	晶体振荡器频率	基准振荡器		16		MHz
10.5.6	t_{XTAL}	基准振荡器建立时间	推出睡眠状态，引脚 17 (CLKM) 时钟可用		0.3	1	ms
10.5.7		基准振荡器精确度	$f_{\text{PSDU}}=20/40/100/250\text{ kbit/s}$ $f_{\text{PSDU}}=200/400/500/1000\text{ kbit/s}$	-60 ₍₁₎ -40		+60 ₍₁₎ +40	ppm ppm
10.5.8		电池监测器阈值偏差		-0.1	0.0	0.1	V

附注： 1. [1]规定基准频率精确度为 $\pm 40\text{ppm}$

10.6 发送器特性

测试条件: $T_{OP}=25^{\circ}C$, $V_{DD}=3.0V$

编号	符号	参数	条件	最小值	标准值	最大值	单位
10.6.1	P_{TX}	发射输出功率	标准模式 加速模式 ⁽¹⁾		5 10		dBm dBm dBm
10.6.2	P_{RANGE}	输出功率范围	22 步长		21		dB
10.6.3	P_{ACC}	输出功率公差	OQPSK-100, 868.3 MHz, $P_{TX} = 0$ dBm (寄存器 0x05 值 = 0x65)			±3	dB
10.6.4	P_{1dB}	1dB 压缩点	标准模式 加速模式		5 8		dBm dBm
10.6.5	EVM	误差向量幅度	符号[1]O-QPSK 欧洲频段 反之		25 6		%ms %ms
10.6.6	P_{HARM}	谐波 第二谐波 第三谐波	BPSK 调制 $P_{TX} = 0$ dBm $P_{TX} = 5$ dBm $P_{TX} = 0$ dBm $P_{TX} = 5$ dBm		-41 -29 -33 -29		dBm dBm dBm dBm
10.6.7	PSD	功率谱密度掩码	欧洲频段, 测量于在第一旁瓣 使用 100kHz 带宽 (载波偏置 400 至 500kHz 的集成功率), OQPSK-100, 868.3 MHz, $P_{TX} = 0$ dBm (寄存器 0x05 值 = 0x65)		-38		dBm
10.6.8	P_{SPUR}	杂散发射 30-1000MHz 1-12.75GHz	除谐波以外		-60 -47		dBm dBm

附注: 1.加速模式中的增大谐波和杂散发射

10.7 接收器特性

测试条件: $T_{OP}=25^{\circ}C$, $V_{DD}=3.0V$

编号	符号	参数	条件	最小值	标准值	最大值	单位
10.7.1	P_{SENS}	接收器灵敏度 20 kbit/s ⁽¹⁾ 40 kbit/s ⁽¹⁾ 100 kbit/s ⁽¹⁾ 250 kbit/s ⁽¹⁾ 200 kbit/s 400 kbit/s 500 kbit/s 1000 kbit/s	AWGN 信道, $PER \leq 1\%$ PSDU 长度:20octet PSDU 长度:20octet PSDU 长度:20octet PSDU 长度:20octet PSDU 长度:127octet PSDU 长度:127octet PSDU 长度:127octet PSDU 长度:127octet		-110 -108 -101 -101 -98 -93 -98 -93		dBm dBm dBm dBm dBm dBm dBm dBm
10.7.2	NF	噪声系数			7		dB
10.7.3	P_{RXMAX}	RX 输入电平最大值	$PER \leq 1\%$, PSDU 长度:20octet		-5		dBm

编号	符号	参数	条件	最小值	标准值	最大值	单位
10.7.4		相邻及交替相邻信道抑制, 20kbit/s 的 BPSK 调制 $P_{RX}=-89\text{dBm}, PER \leq 1\%$	$\Delta f = -1\text{ MHz}$ $\Delta f = +1\text{ MHz}$ $\Delta f = -2\text{ MHz}$ $\Delta f = +2\text{ MHz}$		32 19 37 38		dB dB dB dB
10.7.5		相邻及交替相邻信道抑制, 40kbit/s 的 BPSK 调制 $P_{RX}=-89\text{dBm}, PER \leq 1\%$	$\Delta f = -2\text{ MHz}$ $\Delta f = +2\text{ MHz}$ $\Delta f = -4\text{ MHz}$ $\Delta f = +4\text{ MHz}$		36 35 52 53		dB dB dB dB
10.7.6		相邻及交替相邻信道抑制, 100kbit/s 的 O-QPSK 调制 $P_{RX}=-82\text{dBm}, PER \leq 1\%$	$\Delta f = -1\text{ MHz}$ $\Delta f = +1\text{ MHz}$ $\Delta f = -2\text{ MHz}$ $\Delta f = +2\text{ MHz}$		25 16 34 35		dB dB dB dB
10.7.7		相邻及交替相邻信道抑制, 250kbit/s 的 O-QPSK 调制 $P_{RX}=-82\text{dBm}, PER \leq 1\%$	$\Delta f = -2\text{ MHz}$ $\Delta f = +2\text{ MHz}$ $\Delta f = -4\text{ MHz}$ $\Delta f = +4\text{ MHz}$		27 27 49 49		dB dB dB dB
10.7.8		LO 泄露			-67		dBm
10.7.9	IIP3	三 交调截取点			-12		dBm
10.7.10	IIP2	二 交调截取点			20		dBm
10.7.11		RSSI 范围		-100		-12	dBm

附注：1.符合 IEEE802.15.4-2006 标准

10.8 电流消耗规格

测试条件： $T_{OP}=25^{\circ}\text{C}$, $V_{DD}=3.0\text{V}$, CLKM=OFF

编号	符号	参数	条件	最小值	标准值	最大值	单位
10.8.1	IBUSY_TX	电源电流发送模式	北美频段设置 $P_{TX} = 0\text{ dBm}$ (标准模式) $P_{TX} = 5\text{ dBm}$ (标准模式) $P_{TX} = 10\text{ dBm}$ (加速模式)		14 18 24		mA mA mA
10.8.2	IRX_ON	RX_ON (收听) 模式电源电流			9.0		mA
10.8.3	IPLL_ON	PLL_ON 模式电源电流			4.7		mA
10.8.4	ITRX_OFF	TRX_OFF 模式电源电流			0.4		mA
10.8.5	ISLEEP	睡眠模式电源电流			0.2		μA

10.9 晶体参数要求

编号	符号	参数	条件	最小值	标准值	最大值	单位
10.9.1	f _{XTAL}	晶体频率			16		MHz
10.9.2	C _L	负载电容		8		14	pF
10.9.3	C _{STATIC}	静态电容				7	pF
10.9.4	R ₁	串联电阻				100	Ω

11 寄存器参考资料

AT86RF212 提供 64 个 8 位寄存器的寄存器空间，用于配置，控制和监控无线电收发器。

附注：下表中未列出的所有寄存器均为预留内部使用，且不得被覆盖。当写入某个寄存器时，只能用复位值覆盖寄存器位。

表 11-1. 寄存器总览

地址	名称	第 7 位	第 6 位	第 5 位	第 4 位	第 3 位	第 2 位	第 1 位	第 0 位	页码
0x00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0x01	TRX STATUS	CCA DONE	CCA STATUS	-	TRX STATUS[4]	TRX STATUS[3]	TRX STATUS[2]	TRX STATUS[1]	TRX STATUS[0]	38,58,86
0x02	TRX STATE	TRAC STATUS[2]	TRAC STATUS[1]	TRAC STATUS[0]	TRX_CMD[4]	TRX_CMD[3]	TRX_CMD[2]	TRX_CMD[1]	TRX_CMD[0]	39,59
0x03	TRX_CTRL_0	PAD IO[1]	PAD IO[0]	PAD IO_CLKM[1]	PAD IO_CLKM[0]	CLKM_SHA_SEL	CLKM_CTRL[2]	CLKM_CTRL[1]	CLKM_CTRL[0]	8,119
0x04	TRX_CTRL_1	PA_EXT_EN	IRQ_2_EXT_EN	TX_AUTO_CRC_ON	RX_BL_CTRL	SPL_CMD_MODE[1]	SPL_CMD_MODE[0]	IRQ_MASK_MODE	IRQ_POLARITY	20,26,60 78,142, 144,146
0x05	PHY_TX_PWR	PA BOOST	GC PA[1]	GC PA[0]	TX_PWR[4]	TX_PWR[3]	TX_PWR[2]	TX_PWR[1]	TX_PWR[0]	106
0x06	PHY_RSSI	RX_CRC_VALID	RND_VALUE[1]	RND_VALUE[0]	RSSI[4]	RSSI[3]	RSSI[2]	RSSI[1]	RSSI[0]	78,80,138
0x07	PHY_ED_LEVEL	ED_LEVEL[7]	ED_LEVEL[6]	ED_LEVEL[5]	ED_LEVEL[4]	ED_LEVEL[3]	ED_LEVEL[2]	ED_LEVEL[1]	ED_LEVEL[0]	83
0x08	PHY_CC_CCA	CCA_REQUEST	CCA_MODE[1]	CCA_MODE[0]	CHANNEL[4]	CHANNEL[3]	CHANNEL[2]	CHANNEL[1]	CHANNEL[0]	87,89,124
0x09	CCA_THRES	-	-	-	-	CCA_ED_THRES[3]	CCA_ED_THRES[2]	CCA_ED_THRES[1]	CCA_ED_THRES[0]	88,90
0x0A	-	-	-	JCM_EN	-	-	-	-	-	-
0x0B	SFD_VALUE	SFD_VALUE[7]	SFD_VALUE[6]	SFD_VALUE[5]	SFD_VALUE[4]	SFD_VALUE[3]	SFD_VALUE[2]	SFD_VALUE[1]	SFD_VALUE[0]	148
0x0C	TRX_CTRL_2	RX_SAFE_MODE	TRX_OFF_AVDD_EN	OQPSK_SCRAM_EN	OQPSK_SUB1_RC_EN	BPSK_OQPSK	SUB_MODE	OQPSK_DATA_RATE[1]	OQPSK_DATA_RATE[0]	95,114 147
0x0D	ANT_DIV	-	-	-	-	-	ANT_EXT_SW_EN	ANT_CTRL[1]	ANT_CTRL[0]	140
0x0E	IRQ_MASK	MASK_TRX_LOW	MASK_TRX_UR	MASK_AMI	MASK_CCA_ED_DONE	MASK_TRX_END	MASK_RX_START	MASK_PLL_UNLOCK	MASK_PLL_LOCK	25
0x0F	IRQ_STATUS	BAT_LOW	TRX_UR	AMI	CCA_ED_DONE	TRX_END	RX_START	PLL_UNLOCK	PLL_LOCK	26
0x10	VREG_CTRL	AVREG_EXT	AVDD_OK	-	-	DVREG_EXT	DVDD_OK	-	-	113
0x11	BATMON	-	-	BATMON_OK	BATMON_HR	BATMON_VTH[3]	BATMON_VTH[2]	BATMON_VTH[1]	BATMON_VTH[0]	116
0x12	XOSC_CTRL	XTAL_MODE[3]	XTAL_MODE[2]	XTAL_MODE[1]	XTAL_MODE[0]	XTAL_TRIM[3]	XTAL_TRIM[2]	XTAL_TRIM[1]	XTAL_TRIM[0]	121
0x13	CC_CTRL_0	CC_NUMBER[7]	CC_NUMBER[6]	CC_NUMBER[5]	CC_NUMBER[4]	CC_NUMBER[3]	CC_NUMBER[2]	CC_NUMBER[1]	CC_NUMBER[0]	125
0x14	CC_CTRL_1	-	-	-	-	-	CC_BAND[2]	CC_BAND[1]	CC_BAND[0]	125
0x15	RX_SYN	RX_PDT_DIS	-	-	-	RX_PDT_LEVEL[3]	RX_PDT_LEVEL[2]	RX_PDT_LEVEL[1]	RX_PDT_LEVEL[0]	99
0x16	RF_CTRL_0	PA_LT[1]	PA_LT[0]	-	-	-	-	GC_TX_OFFS[1]	GC_TX_OFFS[0]	105
0x17	XAH_CTRL_1	-	CSMA_LBT_MODE	AACK_FLTR_RES_FT	AACK_UPLD_RES_FT	-	AACK_ACK_TIME	AACK_PROM_MODE	-	61,72,90
0x18	FTN_CTRL	FTN_START	-	-	-	-	-	-	-	127
0x19	RF_CTRL_1	RF_MC[3]	RF_MC[2]	RF_MC[1]	RF_MC[0]	-	-	-	-	99
0x1A	PLL_CF	PLL_CF_START	-	-	PLL_CF[4]	PLL_CF[3]	PLL_CF[2]	PLL_CF[1]	PLL_CF[0]	129
0x1B	PLL_DCU	PLL_DCU_START	-	-	-	-	-	-	-	126
0x1C	PART_NUM	PART_NUM[7]	PART_NUM[6]	PART_NUM[5]	PART_NUM[4]	PART_NUM[3]	PART_NUM[2]	PART_NUM[1]	PART_NUM[0]	21
0x1D	VERSION_NUM	VERSION_NUM[7]	VERSION_NUM[6]	VERSION_NUM[5]	VERSION_NUM[4]	VERSION_NUM[3]	VERSION_NUM[2]	VERSION_NUM[1]	VERSION_NUM[0]	21
0x1E	MAN_ID_0	MAN_ID_0[7]	MAN_ID_0[6]	MAN_ID_0[5]	MAN_ID_0[4]	MAN_ID_0[3]	MAN_ID_0[2]	MAN_ID_0[1]	MAN_ID_0[0]	21
0x1F	MAN_ID_1	MAN_ID_1[7]	MAN_ID_1[6]	MAN_ID_1[5]	MAN_ID_1[4]	MAN_ID_1[3]	MAN_ID_1[2]	MAN_ID_1[1]	MAN_ID_1[0]	22
0x20	SHORT_ADDR_0	SHORT_ADDR_0[7]	SHORT_ADDR_0[6]	SHORT_ADDR_0[5]	SHORT_ADDR_0[4]	SHORT_ADDR_0[3]	SHORT_ADDR_0[2]	SHORT_ADDR_0[1]	SHORT_ADDR_0[0]	73
0x21	SHORT_ADDR_1	SHORT_ADDR_1[7]	SHORT_ADDR_1[6]	SHORT_ADDR_1[5]	SHORT_ADDR_1[4]	SHORT_ADDR_1[3]	SHORT_ADDR_1[2]	SHORT_ADDR_1[1]	SHORT_ADDR_1[0]	73
0x22	PAN_ID_0	PAN_ID_0[7]	PAN_ID_0[6]	PAN_ID_0[5]	PAN_ID_0[4]	PAN_ID_0[3]	PAN_ID_0[2]	PAN_ID_0[1]	PAN_ID_0[0]	73
0x23	PAN_ID_1	PAN_ID_1[7]	PAN_ID_1[6]	PAN_ID_1[5]	PAN_ID_1[4]	PAN_ID_1[3]	PAN_ID_1[2]	PAN_ID_1[1]	PAN_ID_1[0]	73



地址	名称	第 7 位	第 6 位	第 5 位	第 4 位	第 3 位	第 2 位	第 1 位	第 0 位	页码
0x24	IEEE_ADDR_0	IEEE_ADDR_0[7]	IEEE_ADDR_0[6]	IEEE_ADDR_0[5]	IEEE_ADDR_0[4]	IEEE_ADDR_0[3]	IEEE_ADDR_0[2]	IEEE_ADDR_0[1]	IEEE_ADDR_0[0]	74
0x25	IEEE_ADDR_1	IEEE_ADDR_1[7]	IEEE_ADDR_1[6]	IEEE_ADDR_1[5]	IEEE_ADDR_1[4]	IEEE_ADDR_1[3]	IEEE_ADDR_1[2]	IEEE_ADDR_1[1]	IEEE_ADDR_1[0]	74
0x26	IEEE_ADDR_2	IEEE_ADDR_2[7]	IEEE_ADDR_2[6]	IEEE_ADDR_2[5]	IEEE_ADDR_2[4]	IEEE_ADDR_2[3]	IEEE_ADDR_2[2]	IEEE_ADDR_2[1]	IEEE_ADDR_2[0]	74
0x27	IEEE_ADDR_3	IEEE_ADDR_3[7]	IEEE_ADDR_3[6]	IEEE_ADDR_3[5]	IEEE_ADDR_3[4]	IEEE_ADDR_3[3]	IEEE_ADDR_3[2]	IEEE_ADDR_3[1]	IEEE_ADDR_3[0]	74
0x28	IEEE_ADDR_4	IEEE_ADDR_4[7]	IEEE_ADDR_4[6]	IEEE_ADDR_4[5]	IEEE_ADDR_4[4]	IEEE_ADDR_4[3]	IEEE_ADDR_4[2]	IEEE_ADDR_4[1]	IEEE_ADDR_4[0]	75
0x29	IEEE_ADDR_5	IEEE_ADDR_5[7]	IEEE_ADDR_5[6]	IEEE_ADDR_5[5]	IEEE_ADDR_5[4]	IEEE_ADDR_5[3]	IEEE_ADDR_5[2]	IEEE_ADDR_5[1]	IEEE_ADDR_5[0]	75
0x2A	IEEE_ADDR_6	IEEE_ADDR_6[7]	IEEE_ADDR_6[6]	IEEE_ADDR_6[5]	IEEE_ADDR_6[4]	IEEE_ADDR_6[3]	IEEE_ADDR_6[2]	IEEE_ADDR_6[1]	IEEE_ADDR_6[0]	75
0x2B	IEEE_ADDR_7	IEEE_ADDR_7[7]	IEEE_ADDR_7[6]	IEEE_ADDR_7[5]	IEEE_ADDR_7[4]	IEEE_ADDR_7[3]	IEEE_ADDR_7[2]	IEEE_ADDR_7[1]	IEEE_ADDR_7[0]	75
0x2C	XAH_CTRL_0	MAX_FRAME_RETRIES[3]	MAX_FRAME_RETRIES[2]	MAX_FRAME_RETRIES[1]	MAX_FRAME_RETRIES[0]	MAX_CSMA_RETRIES[2]	MAX_CSMA_RETRIES[1]	MAX_CSMA_RETRIES[0]	SLOTTED_OPERATION	63
0x2D	CSMA_SEED_0	CSMA_SEED_0[7]	CSMA_SEED_0[6]	CSMA_SEED_0[5]	CSMA_SEED_0[4]	CSMA_SEED_0[3]	CSMA_SEED_0[2]	CSMA_SEED_0[1]	CSMA_SEED_0[0]	63
0x2E	CSMA_SEED_1	AACK_FVN_MODE[1]	AACK_FVN_MODE[0]	AACK_SET_PD	AACK_DIS_ACK	AACK_I_AM_COORD	CSMA_SEED_0[2]	CSMA_SEED_0[1]	CSMA_SEED_0[0]	64,75
0x2F	CSMA_BE	MAX_BE[3]	MAX_BE[2]	MAX_BE[1]	MAX_BE[0]	MIN_BE[3]	MIN_BE[2]	MIN_BE[1]	MIN_BE[0]	65

AT86RF212 的寄存器在 P_ON 状态下^(1, 2, 3)的复位值如表 11-2 所示。

附注：表 11-2 中所列出的复位值只在复位后通电才能生效。在复位程序 (/RST=L) (如 5.1.4.5 小节所示) 之后，所选寄存器的复位值 (如，寄存器 0x01, 0x10, 0x11, 0x30) 可能与表 11-2 中的值不同。

表 11-2. 寄存器总览-复位值

地址	复位值	地址	复位值	地址	复位值	地址	复位值
0x00	0x00	0x10	0x00 ⁽¹⁾	0x20	0xFF	0x30	0x00 ⁽³⁾
0x01	0x00	0x11	0x02 ⁽¹⁾	0x21	0xFF	0x31	0x00
0x02	0x00	0x12	0xF0	0x22	0xFF	0x32	0x00
0x03	0x19	0x13	0x00	0x23	0xFF	0x33	0x00
0x04	0x20	0x14	0x00	0x24	0x00	0x34	0x3F
0x05	0x60	0x15	0x00	0x25	0x00	0x35	0x00
0x06	0x00	0x16	0x31	0x26	0x00	0x36	0x00
0x07	0xFF	0x17	0x00	0x27	0x00	0x37	0x00
0x08	0x25	0x18	0x58	0x28	0x00	0x38	0x00
0x09	0x77	0x19	0x00	0x29	0x00	0x39	0x40
0x0A	0x17	0x1A	0x48	0x2A	0x00	0x3A	0x00
0x0B	0xA7	0x1B	0x40	0x2B	0x00	0x3B	0x00
0x0C	0x24	0x1C	0x06	0x2C	0x38	0x3C	0x00
0x0D	0x01	0x1D	0x01	0x2D	0xEA	0x3D	0x00
0x0E	0x00	0x1E	0x1F	0x2E	0x42	0x3E	0x00
0x0F	0x00	0x1F	0x00	0x2F	0x53	0x3F	0x00

- 附注：
1. 当寄存器 0x10 的复位值为 0x00 时，只有在 DVREG 可用时，才能对寄存器进行实际访问。因此，此寄存器总读数为 0x04。详细情况请参看 7.5 小节。
 2. 当寄存器 0x11 的复位值为 0x02 时，只有在 BATMON 可用时，才能对寄存器进行实际访问。因此，在 P_ON 状态下，此寄存器总读数为 0x22。详细情况请参看 7.6 小节。
 3. 当寄存器 0x30 的复位值为 0x00 时，只有在无线电收发器可访问时，才能对寄存器进行实际访问。因此，此寄存器：

- a) 复位后在 P_ON 状态下，读出为 0x11
- b) 复位后在任何其他状态下，读出为 0x07

12. 缩写释义

ACK	—	应答
ADC	—	模数转换器
AES	—	高级加密标准
AGC	—	自动增益控制
AVREG	—	数字电压调节器
AWGN	—	加性高 白噪声
BATMON	—	电池监测器
BBP	—	基带处理器
BPF	—	带通滤波器
BPSK	—	二相相移键控
CBC	—	加密块链接
CCA	—	空闲信道评估
CF	—	中心频率
CRC	—	循环冗余校验
CS	—	载波侦听
CSMA-CA	—	载波侦听多路访问防冲突
CW	—	连续波
DAC	—	数模转换器
DVREG	—	数字电压调节器
ECB	—	电子密码本
ED	—	能量检测
ESD	—	静电释放
FCF	—	帧控制字段
FCS	—	帧校验序列
FIFO	—	先进先出
FTN	—	滤波器调谐
IC	—	集成电路
IF	—	中频频率
I/O	—	输入/输出
IRQ	—	中断请求
ISM	—	工业、 和
LBT	—	说前先听
LDO	—	低压差
LNA	—	低噪声放大器
LO	—	本地振荡器
LPF	—	低通滤波器
LQI	—	链路质量显示
LSB	—	最低有效位
MAC	—	介质访问控制
MHR	—	MAC 标题
MIC	—	信息完整性检查
MISO	—	主机输入/从机输出
MOSI	—	主机输出/从机输入
MSB	—	最高有效位
MSDU	—	MAC 服务数据单元
O-QPSK	—	偏移四相移相键控
PA	—	功率放大器
PAN	—	个人局域网
PER	—	包错误率
PHR	—	PHY 标头
PHY	—	物理层
PLL	—	锁相环

PPDU	—	PHY 协议数据单元
PPF	—	多相滤波器
PRBS	—	随机二进制序列
PSD	—	功率谱密度
PSDU	—	PHY 服务数据单元
QFN	—	方形扁平无封装
RC	—	升余弦
RF	—	射频
RSSI	—	接收信号强度显示
RX	—	接收器
SFD	—	帧起始定界符
SHR	—	同步标头
SPI	—	串行总线接口
SRAM	—	静态随机访问存储器
SRD	—	短距离设备
TRX	—	收发器
TX	—	发送器
VCO	—	电压控制振荡器
WPAN	—	无线个人区域网络
XOSC	—	晶体振荡器
XTAL	—	晶体

13.订 信息

订 型号	封装	电压范围	温度范围
AT86RF212-ZU	QN	1.8V-3.6V	工业 (-40°C 至+85°C) 无 /无 素

封装类型	说明
QN	32QN2, 32 , 主体 5.0x5.0mm, 引脚中心 0.50mm, 已切割方形扁平无 封 装 (QFN)

附注: T&R 数量 4, 000。

请联系 所在地的 Atmel 中心, 以获得更详尽的订 信息和最小起订量。

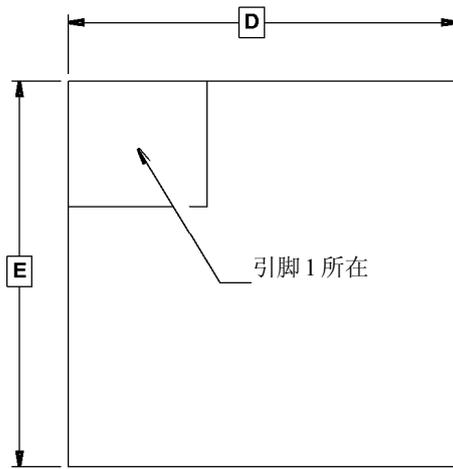
14.焊 信息

推荐依照 IPC/JEDEC J-STD-.020C 规定的焊 特性。

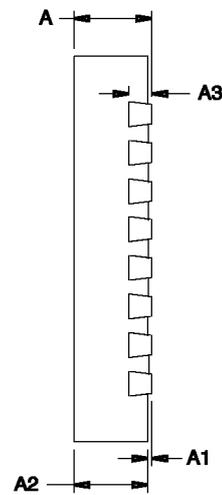
15.封装热性能

热阻	
速度[m/s]	接合面至外界热阻[k/W]
0	40.9
1	35.7
2.5	32.0

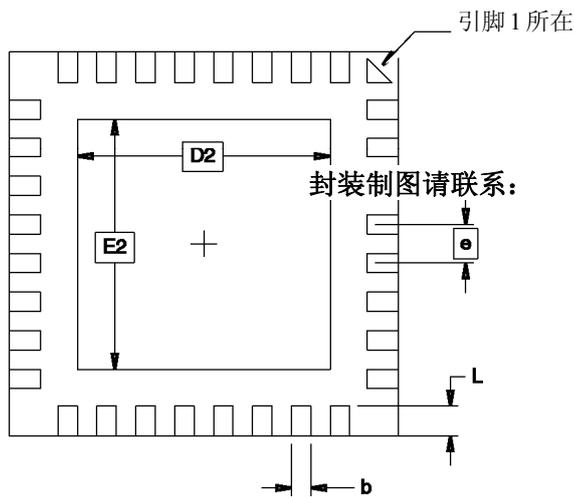
16.封装示意图-32QN2



面图



面图



面图

一般尺寸
(计量单位=mm)

符号	最小值	常规值	最大值	附注
D	5.00 BSC			
E	5.00 BSC			
D2	3.20	3.30	3.40	
E2	3.20	3.30	3.40	
A	0.80	0.90	1.00	
A1	0.0	0.02	0.05	
A2	0.0	0.65	1.00	
A3	0.20 REF			
L	0.30	0.40	0.50	
e	0.50 BSC			
b	0.18	0.23	0.30	2

附注： 1.此图仅用于提供基本信息。适当尺寸请参看 JEDEC 图 MO-220，变更 VHHD-6。
2.尺寸 b 用于制作端子，离端子端的离应在 0.15mm 至 0.30mm 之间。若端子在其他端有选配半径，那么不应在半径区域测量该尺寸。

11/26/07



封装制图请联系：
packagedrawings@atmel.com

图名：
32QN2, 32 ，主体 5.0x5.0mm，引脚中心
0.50mm，已切割方形扁平无 封装（QFN）

GPC

ZJZ

封图号

32QN2

修订版

A



附件A——连续发送测试模式

A.1-概览

AT86RF212 提供连续发送测试模式以便支持应用/生产测试及认证测试。无线电收发器使用此测试模式连续发送先前传输的帧（PRBS 模式）或连波信号（CW 模式）。

在 CW 模式下，每个信道可发送四种不同的信号频率：

- $f_1=f_{CH}+0.25\text{MHz}$ 使用 O-QPSK 1000kbit/s 模式
- $f_2=f_{CH}-0.25\text{MHz}$ 使用 O-QPSK 1000kbit/s 模式
- $f_3=f_{CH}+0.1\text{MHz}$ 使用 O-QPSK 400kbit/s 模式
- $f_4=f_{CH}-0.1\text{MHz}$ 使用 O-QPSK 400kbit/s 模式

f_{CH} 为信道中心频率，参看 7.8.2 小节。

请注意，在 CW 模式中不能直接在信道中心频率发送 RF 信号。

帧缓冲中的 PSDU 数据必须含有至少一个有效 PHR（见 6.1 小节）。建议对 PRBS 模式使用最大长度帧（127 字节）和任意 PSDU 数据。在发送两个符号的 PSDU 数据之后，连续重复发送。

A.2-配置

在启用连续发送测试模式之前，须对所有寄存器执行以下配置：

- TX 信道设置（选择性）
- TX 输出功率设置（选择性）
- 模式选择（PRBS/CW）

对寄存器 0x36 和 0x1C 进行写入访问，启用连续发送测试模式。

通过启用 PLL（TRX_CMD=PLL_ON）和在寄存器 0x02 写入 TX_START 命令开始发送。

即便是 CW 信号发送，也需要在帧缓冲中写入有效 PSDU 数据。建议为 PRBS 模式写入最大长度帧。

详细的设置时序如表 A-1 所示。R/W 列指示寄存器或帧缓冲的写入（W）或读取（R）。

表 A-1.连续发送设置时序

步骤	动作	寄存器	R/W	值	说明
1	复位				将 AT86RF212 复位
2	寄存器访问	0x0E	W	0x01	设置 IRQ 掩码寄存器, 启用 IRQ_0 (PLL_LOCK)
3	寄存器访问	0x04	W	0x00	关闭 TX_AUTO_CRC_ON
4	寄存器访问	0x02	W	0x03	将无线电收发器状态设置为 TRX_OFF
5	寄存器访问		W		设置信道, 参看 7.8.2
6	寄存器访问		W		设置 TX 输出功率, 参看 7.3.4 小节
7	寄存器访问	0x01	R	0x08	检验 TRX_OFF 状态
8	寄存器访问	0x36	W	0x0F	开启连续发送测试模式-第 1 步
9	寄存器访问	0x0C	W		CW 模式: 开启无扰频器高数据传输速率模式, 400kbit/s 或 1000kbit/s (寄存器值分别为 0x0A 或 0x0E) PRBS 模式: 选择调制方式, 参看 7.1.5
10	帧缓冲写入访问		W		写入 PSDU 数据 (CW 模式也需要), 参看表 A-2。帧缓冲内容依不同调制方式而变化。
11	寄存器访问	0x1C	W	0x54	开启连续发送测试模式-第 2 步
12	寄存器访问	0x1C	W	0x46	开启连续发送测试模式-第 3 步
13	寄存器访问	0x02	W	0x09	开始 PLL_ON 状态
14	中断事件	0x0F	R	0x01	要求 IRQ_0 (PLL_LOCK)
15	寄存器访问	0x02	W	0x02	开始发送, 进入 BUSY_TX 状态
16	测量				执行测量
17	寄存器访问	0x1C	W	0x00	关闭连续发送测试模式
18	复位				将 AT86RF212 复位

须定义连续发送 PRBS 模式或 CW 模式的帧缓冲内容。为了测量发送器功率谱密度 (PSD) 掩码, 建议对 PSDU 数据使用最大长度的随机时序。

为了测量 CW 信号, 必须在帧缓冲中写入 0x00 或 0xFF, 详细信息请参看表 A-2。

表 A-2. 不同连续发送调制方式的帧缓冲内容

步骤	动作	帧内容	备注
11	帧缓冲访问	随机时序	已调制 RF 信号
		0x00(每个字节)	$f_{CH}-0.1\text{MHz}$, CW 信号 $f_{CH}-0.25\text{MHz}$, CW 信号
		0xFF(每个字节)	$f_{CH}+0.1\text{MHz}$, CW 信号 $f_{CH}+0.25\text{MHz}$, CW 信号

A.3-寄存器说明

寄存器 0x36 (TST_CTRL_DIGI):

寄存器 TST_CTRL_DIGI 开启连续发送测试模式。

表 A-3. 寄存器 0x36 (TST_CTRL_DIGI)

位	7	6	5	4
名称	预留	预留	预留	预留
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0
位	3	2	1	0
名称	TST_CTRL_DIG	TST_CTRL_DIG	TST_CTRL_DIG	TST_CTRL_DIG
读取/写入	R/W	R/W	R/W	R/W
复位值	0	0	0	0

• 7: 4 位-预留

• 3: 0 位-TX_CTRL_DIG

这些寄存器位用于开启连续发送:

表 A-4. 连续发送

寄存器位	值	说明
TST_CTRL_DIG	0x0	关闭连续发送
	0xF	开启连续发送
	0x1-0xE	预留

附件 B- 误
AT86RF212 修订版A

无 误。

参考资料

- [1] IEEE 标准 802.15.4TM-2006。低速率无线个人网络 (WPANs) 无线介质访问控制 (MAC) 与物理层 (PHY) 规格要求
- [2] IEEE 标准 802.15.4TM-2003。低速率无线个人网络 (WPANs) 无线介质访问控制 (MAC) 与物理层 (PHY) 规格要求
- [3] IEEE P802.15.4cTM/D6, 2008 11 :对低速率无线个人区域网络(LR-WPANs)的无线媒体存取控制(MAC)和物理层(PHY)的规范:
修订 2: 可选择物理层扩展来支持一个或多个中国 314-316 MHz, 430-434 MHz 和 779-787 MHz 频段。
- [4] ETSI EN 300 220-1V2.2.1(2008-04):用于 25MHz 至 1000MHz 间频率且功率级别不超过 500mW 的电 兼容性与无线电频谱事项 (ERM); 短 离设备 (SRD); 无线电设备; 第 1 部分: 技术特性与检测方法
- [5] ANSI/ESD-STM5.1-2001: 人体模型 (HBM) 静电放电敏感产测试 ESD 协会标准测试方法。
- [6] ESD-STM5.3.1-1999: 带点器件模型 (CDM) 静电放电敏感产测试 ESD 协会标准测试方法。
- [7] NIST FIPS PUB 197:高级加密标准 (AES), 联 信息处理标准公布 197, 美国商部/NIST, 2001 11 26 。

目录

免责声明	2
1. 概览	2
1.1 基本电路说明	4
2. 引脚配置	4
2.1 引脚排列原理图	4
2.2 引脚说明	4
3. 应用电路	10
3.1 基本应用原理图	10
3.2 扩展功能组应用原理图	11
4. 微控制器接口	14
4.1 概览	14
4.2 SPI时序介绍	15
4.3 SPI协议	16
4.4 PHY 状态信息	21
4.5 无线电收发器识别	22
4.6 睡眠/唤醒与发送信号 (SLP_TR)	23
4.7 中断逻辑	25
5. 操作模式	30
5.1 基本操作模式	30
5.2 扩展操作模式	42
6. 功能介绍	69
6.1 序言-IEEE802.15.4-2006 帧结构	69
6.2 帧滤波器	73
6.3 帧校验序列 (FCS)	79
6.4 接收信号强度指示器 (RSSI)	82
6.5 能量检测 (ED)	84
6.6 空闲信道评估 (CCA)	87
6.7 说前先听 (LBT)	91
1.1 链路质量显示 (LQI)	94
7. 模块说明	95
7.1 物理层模式	95
7.2 接收器 (RX)	100
7.3 发送器 (TX)	103
7.4 帧缓冲	112
7.5 电压调节器 (AVREG, DVREG)	114
7.6 电池监测器 (BATMON)	118



7.7 晶体振荡器 (XOSC) 及时钟输出 (CLKM)	120
7.8 频率合成器 (PLL)	125
7.9 自动滤波器调整 (FTN)	130
8. 无线电收发器的使用	132
8.1 帧接收程序	132
8.2 帧发送程序	133
9. 扩展功能设置	135
9.1 安全模块 (AES)	135
9.2 随机数发生器	142
9.3 可支持基于MAC天线分集的差分输出	143
9.4 RX/TX指示器	145
9.5 RX帧时间戳	147
9.6 帧缓冲空闲指示器	149
9.7 动态帧缓冲保护	151
9.8 可配置帧起始定界符 (SFD)	152
10. 电 特性	153
10.1 绝对最大定 值	153
10.2 操作范围	153
10.3 数字引脚规格	153
10.4 数字接口时序特性	154
10.5 收发器基本规格	155
10.6 发送器特性	156
10.7 接收器特性	156
10.8 电流消耗规格	157
10.9 晶体参数要求	158
11. 寄存器参考资料	159
12. 缩写释义	162
13. 订 信息	164
14. 焊 信息	164
15. 封装热性能	164
16. 封装示意图-32QN2	165
附件A——连续发送测试模式	166
A.1-概览	166
A.2-配置	166
A.3-寄存器说明	168
附件 B- 误	169
AT86RF212 修订版A	169
参考资料	170
目录	171



总部

外

Atmel 公	Atmel 洲	Atmel 欧洲	Atmel 本
2325 Orchard Parkway San Jose CA 95131 美国 电 : 1(408)441-0311 传真: 1(408)487-2600	道 418 号 之 5 期 行 中心 19 层 1-5 及 16 电 :(852)2245-6100 传 真:(852)2722-1369	Le Krebs 8,Rue Jean-Pierre Timbaud BP 309 78054 Saint-Quentin-en-Yvelines Cedex 法国 电 :(33)1-30-60-70-00 传真:(33)1-30-60-71-11	9F,Tonetsu,Shinkawa Bldg. 1-24-8 Shinkawa Chuo-ku,Tokyo 104-0033 本 电 :(81)3-3523-3551 传真:(81)3-3523-7581

产品联系方式

网	技术支持	联系方式
www.atmel.com	avr@atmel.com	www.atmel.com/contacts

资料索取
www.atmel.com/literature

免责声明: 本资料随相关 Atmel 产品一起提供。本文件或随 Atmel 产品的 均未 予任何许可或以禁止等其他方式明示或 示地 予任何指示产权权利。若非 ATMEL 网 上的 条款与条件另有规定, ATMEL 将不 并免去任何与此产品相关的明示、 示或规定的 保责任, 包括但不限于商业可实施性, 对指定用的适 性等的 保或任何非 权行为。ATMEL 不对因使用不当或未能按照本文件使用而造成的任何直接、间接、相应引起的, 性的, 特殊或意外事 负责(包括但不限于 利 损, 业中断, 或信息流失等损失), 尽管 ATMEL 可能已经知道存在发生此类损失的可能性。Atmel 未对本文件内容的准确性和完整性在任何时候做出过任何标示或 保, 并保留随时修改规格要求和产品描述的权利, 不另行通知。Atmel 未做出任何更新本文件内容的 。若若非有特别规定, Atmel 产品不适用于且不得用于 制造业的应用中至此。Atmel 产品并非设计, 权或保证用做支 应用或长期应用的部件。

©2009 Atmel 公 。保留全部权利。Atmel®,标准和二者组合, AVR®, 标 等均为 Atmel 公 或其子公 的注册商标。其他术 和品名可能是其他所有者持有的商标。

Mouser Electronics

Authorized Distributor

Click to View Pricing, Inventory, Delivery & Lifecycle Information:

[Atmel:](#)

[AT86RF212-ZUR](#)