

自动IEEE 802.15.4工作模式

作者: Mary O'Keefe

简介

本应用笔记描述ADF7242收发器IC的自动IEEE802.15.4工作模式，该工作模式通过无线电控制器代码模块RCCM_IEEEEX_R1使能。RCCM_IEEEEX_R1代码模块使ADF7242具备下列特性：

- 自动IEEE 802.15.4帧滤波
- 收到有效IEEE 802.15.4帧的自动应答
- 使用支持自动重试的非时隙CSMA_CA进行自动帧传输

图1所示为低功耗2.4 GHz收发器IC ADF7242的框图。该收发器内置一个带掩模ROM的定制MCU内核，用于实现分组处理功能，并将无线电命令转换成内部控制序列。

此外还提供2 kB的程序RAM (PRAM)，用作可配置程序代码存储器。它支持增加无线电控制器命令，以便提供改变的或扩展的功能。本应用笔记所述的无线电控制器代码模块基于下载到程序代码存储器PRAM中的程序代码。

PRAM模块是易失性存储器，每次收发器从休眠状态唤醒时必须重新加载。通过SPI接口可以按顺序访问PRAM位置。RCCM_IEEEEX_R1模块的长度小于2kB。当SCLK时钟速度为10 Mbps时，该代码模块可以在不到1650 μs的时间内下载到PRAM。“代码下载序列”部分详细说明了代码下载机制。

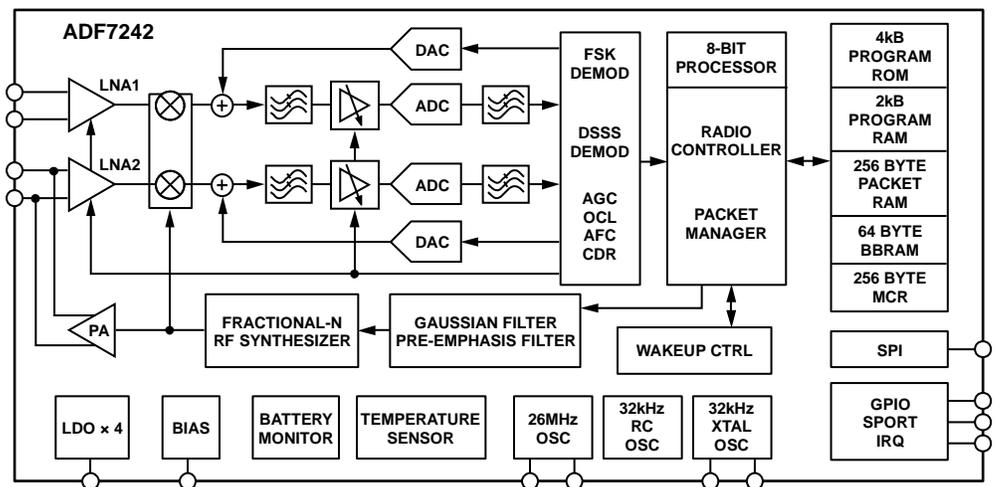


图1. ADF7242框图

目录

简介.....	1	TX自动非时隙CSMA-CA操作.....	8
寄存器映射扩展.....	3	代码下载序列.....	10
帧滤波算法.....	6	更多信息.....	11
帧滤波要求.....	6	下载.....	11
关于帧滤波的更多信息.....	6	参考文献.....	11
RX自动应答.....	7		

寄存器映射扩展

RCCM_IIIEEX_R1模块利用表1所列的额外寄存器进行配置。为了使代码模块和相关的寄存器映射扩展，配置位pkt_cfg.addon_en必须置1。

PRAM代码下载完毕后，表1所列的所有寄存器均处于未定义状态。因此，在将pkt_cfg.addon_en位置1前，必须初始化表1所列的所有寄存器。此外还应将0x8D写入MCR寄存器0x3FB，将0xCA写入MCR寄存器0x3FC。

表1. 自动IEEE 802.15.4模式寄存器映射扩展

寄存器地址	寄存器名称	位域	位域名称	访问模式	复位值	描述
0x112	pan_id0	[7:0]	pan_id0	R/W	X	MAC PAN ID (pan_id)的下8位，用于帧滤波
0x113	pan_id1	[7:0]	pan_id1	R/W	X	MAC PAN ID (pan_id)的上8位，用于帧滤波
0x114	short_addr_0	[7:0]	short_addr_0	R/W	X	MAC短地址(short_addr)的下8位，用于帧滤波
0x115	short_addr_1	[7:0]	short_addr_1	R/W	X	MAC短地址(short_addr)的上8位，用于帧滤波
0x116	ieee_addr_0	[7:0]	ieee_addr_0	R/W	X	IEEE MAC地址的位[7:0]，用于帧滤波
0x117	ieee_addr_1	[7:0]	ieee_addr_1	R/W	X	IEEE MAC地址的位[15:8]，用于帧滤波
0x118	ieee_addr_2	[7:0]	ieee_addr_2	R/W	X	IEEE MAC地址的位[23:16]，用于帧滤波
0x119	ieee_addr_3	[7:0]	ieee_addr_3	R/W	X	IEEE MAC地址的位[31:24]，用于帧滤波
0x11A	ieee_addr_4	[7:0]	ieee_addr_4	R/W	X	IEEE MAC地址的位[39:32]，用于帧滤波
0x11B	ieee_addr_5	[7:0]	ieee_addr_5	R/W	X	IEEE MAC地址的位[47:40]，用于帧滤波
0x11C	ieee_addr_6	[7:0]	ieee_addr_6	R/W	X	IEEE MAC地址的位[55:48]，用于帧滤波
0x11D	ieee_addr_7	[7:0]	ieee_addr_7	R/W	X	IEEE MAC地址的位[63:56]，用于帧滤波
0x11E	ffilt_cfg	[0]	accept_beacon_frames	R/W	X	帧滤波器 0: 丢弃信标帧 1: 接受信标帧
		[1]	accept_data_frames	R/W	X	帧滤波器 0: 丢弃数据帧 1: 接受数据帧
		[2]	accept_ack_frames	R/W	X	帧滤波器 0: 丢弃ACK帧 1: 接受ACK帧
		[3]	accept_maccmd_frames	R/W	X	帧滤波器 0: 丢弃MAC命令帧 1: 接受MAC命令帧
		[4]	accept_reserved_frames	R/W	X	帧滤波器 0: 丢弃保留帧(FCF[2:0] = 保留) 1: 接受保留帧
		[5]	accept_all_address	R/W	X	地址过滤器 0: 使能 1: 接受所有地址
		[7:6]	保留	R/W	X	保留，置0
0x11F	auto_cfg	[0]	auto_ack_framepend	R/W	X	自动RX期间传输的ACK帧中的控制位 FCF[5](帧待定)
		[1]	is_pancoord	R/W	X	0: 器件不是PAN协调器 1: 器件是PAN协调器
		[2]	保留	R/W	X	保留，置0
		[3]	rx_auto_ack_en	R/W	X	0: 禁用 1: 使能RX时自动ACK
		[4]	csma_ca_turnaround	R/W	X	0: 禁用 1: 使能自动周转
		[7:5]	保留	R/W	X	保留，置0

AN-1082

寄存器地址	寄存器名称	位域	位域名称	访问模式	复位值	描述
0x120	auto_tx1	[3:0]	max_frame_retries	R/W	X	指定自动CSMA-CA Tx模式(auto_csma_tx_en = 1)下重新传输未应答帧的尝试次数
		[6:4]	max_cca_retries	R/W	X	指定RC_TX命令(tx_auto_csma_en = 1)取消前重复执行CSMA-CA算法的尝试次数；有效范围0到5；7：CSMA-CA算法禁用
		[7]	保留	R/W	X	保留，置0
0x121	auto_tx2	[3:0]	csma_max_be	R/W	X	指定CSMA-CA算法使用的最大倒退指数；有效范围3到8
		[7:4]	csma_min_be	R/W	X	指定CSMA-CA算法使用的最小倒退指数；有效范围0到csma_max_be
0x122	auto_status	[2:0]	auto_status	R	X	0: SUCCESS 1: SUCCESS_DATPEND 2: FAILURE_CSMACA 3: FAILURE_NOACK 4: ERROR_CFG 5..7: 保留

RCCM_JEEEX_R1代码模块提供一个名为address_match的额外中断源，表示在接收帧中检测到地址匹配。当帧滤波已使能(pkt_cfg.addon_en = 1、ffilt_cfg.accept_all_address_en = 0)，并且接收帧满足“帧滤波算法”部分所述帧滤波算法的所有要求时，address_match中断置位。

表2、表3和表4分别列出了irq1_en1、irq2_en1和irq_src1寄存器中address_match中断控制位的位置。相关规则与ADF7242数据手册的“中断控制器”部分所述相同。

表2. RCCM_IEEEX_R1寄存器irq1_en1更新

寄存器地址	寄存器名称	位域	位域名称	访问模式	复位值	描述
0x3C8	irq1_en1	[0]	cca_complete	R/W	0	状态字中的CCA结果有效
		[1]	rx_sfd	R/W	0	RX操作中检测到SFD
		[2]	tx_sfd	R/W	0	SFD传输开始
		[3]	rx_pkt_rcvd	R/W	0	RX_BUFFER中接收到包
		[4]	tx_pkt_sent	R/W	0	TX_BUFFER中的包已发送
		[5]	frame_valid	R/W	0	RX期间检测到容许的帧
		[6]	address_valid	R/W	0	RX期间检测到地址匹配
		[7]	csma_ca_complete	R/W	0	csma_ca操作已完成

表3. RCCM_IEEEX_R1寄存器irq2_en1更新

寄存器地址	寄存器名称	位域	位域名称	访问模式	复位值	描述
0x3CA	irq2_en1	[0]	cca_complete	R/W	0	状态字中的CCA结果有效
		[1]	rx_sfd	R/W	0	RX操作中检测到SFD
		[2]	tx_sfd	R/W	0	SFD传输开始
		[3]	rx_pkt_rcvd	R/W	0	RX_BUFFER中接收到包
		[4]	tx_pkt_sent	R/W	0	TX_BUFFER中的包已发送
		[5]	frame_valid	R/W	0	RX期间检测到容许的帧
		[6]	address_valid	R/W	0	RX期间检测到地址匹配
		[7]	csma_ca_complete	R/W	0	csma_ca操作已完成

表4. RCCM_IEEEX_R1寄存器irq_src1更新

寄存器地址	寄存器名称	位域	位域名称	访问模式	复位值	描述
0x3CC	irq_src1	[0]	cca_complete	R/W	0	状态字中的CCA结果有效
		[1]	rx_sfd	R/W	0	RX操作中检测到SFD
		[2]	tx_sfd	R/W	0	SFD传输开始
		[3]	rx_pkt_rcvd	R/W	0	RX_BUFFER中接收到包
		[4]	tx_pkt_sent	R/W	0	TX_BUFFER中的包已发送
		[5]	frame_valid	R/W	0	RX期间检测到容许的帧
		[6]	address_valid	R/W	0	RX期间检测到地址匹配
		[7]	csma_ca_complete	R/W	0	csma_ca操作已完成

帧滤波算法

仅当ADF7242在IEEE 802.15.4数据包模式(rc_cfg.rc_mode = 0)下工作时，才能使用帧滤波功能。该功能可拒绝已接收到但不是用于该无线节点的帧。帧滤波程序是IEEE 802.15.4-2006标准第7.5.6.2节(第三级过滤)所述程序的一个超集。

pkt_cfg.addon_en位控制是否使能帧滤波。如果ffilt_cfg.accept_all_address = 1，则忽略接收帧中的地址信息，但ffilt_cfg寄存器中的配置位仍然控制FCF域的过滤。

帧滤波要求

如果ffilt_cfg.accept_all_address = 0，则只有满足以下部分所述全部要求的帧才会被接受。

帧完整性

- FCF的帧类型子域必须包含非保留帧类型。
- FCF的帧版本子域必须包含非保留值。
- FCF中的所有源和目的地址模式都是非保留值。

目的地址

- 如果存在目的PAN标识符，则它必须匹配pan_id或广播PAN标识符(0xFFFF)。
- 如果帧中包括短目的地址，则它必须匹配short_addr或广播地址0xFFFF。
- 如果帧中包括扩展目的地址，则它必须匹配ieee_addr_0到ieee_addr_7。

帧类型 = 信标

- 配置位ffilt_cfg.accept_beacon_frames必须置1。
- 目的地址模式为0(无目的地址)。
- 包括源地址(源地址模式2或模式3)。
- 源PAN标识符必须匹配pan_id或pan_id= 0xFFFF。如果pan_id=0xFFFF，则无论源PAN标识符为何值，都会接受信标帧。

帧类型 = 数据帧

- 配置位ffilt_cfg.accept_data_frames必须置1。
- 帧中必须包括目的地址和/或源地址。如果帧中不含目的地址，则auto_cfg.is_pancoord位必须置1，并且FCF中的源PAN标识符必须等于pan_id。

帧类型 = 应答

- 配置位ffilt_cfg.accept_ack_frames必须置1。
- 长度字节必须等于5。

帧类型 = MAC命令帧

- 配置位ffilt_cfg.accept_maccmd_frames必须置1。
- 帧中必须包括目的地址和/或源地址。如果帧中不含目的地址，则auto_cfg.is_pancoord位必须置1，并且FCF中的源PAN标识符必须等于pan_id。

帧类型 = 保留帧

- 配置位ffilt_cfg.accept_reserved_frames必须置1。
- 帧中必须包括目的地址和/或源地址。如果帧中不含目的地址，则auto_cfg.is_pancoord位必须置1，并且FCF中的源PAN标识符必须等于pan_id。

关于帧滤波的更多信息

如果检测到帧，并且是允许接收的类型，则会产生frame_valid中断。如果已使能，则当接收帧被帧滤波算法接受时，还会产生address_valid中断。当收发器处于RX状态时，每次接收到帧时都会覆盖RX_BUFFER，无论该帧在随后的帧滤波程序中是否被拒绝。

执行地址过滤之前，长度字节的位7被清0。即使接收帧的FCS域无效，address_match中断也会置位。如果已使能，则rx_pkt_rcvd中断仅在接收帧被帧滤波算法接受且其FCS正确时才会置位。

改变pan_id、short_addr、ieee_addr寄存器或ffilt_cfg寄存器所含配置位的值时，不要求退出RX状态。然而，如果在接收有效SFD与接收源地址域之间的时间应用这些改变，帧滤波功能将处于未定义状态，因为ADF7242会使用旧的值或更新的值。

RX自动应答

ADF7242支持在成功接收到帧后自动发送应答帧。RX自动应答功能只能与地址过滤功能一起使用。当`auto_cfg.rx_auto_ack_en`置1且`filt_cfg.accept_all_address`复位为0时，该功能使能。为使该功能正常工作，`pkt_cfg.auto_fcs_off`位和寄存器`buffercfg.rx_buffer_mode`均必须置0。

使能后，当满足下列条件时，就会自动发送应答帧：

- 帧滤波程序接受所收到的帧。
- 接收到的帧不是一个信标或应答帧。
- 接收帧FCF中的应答请求位置1。

图2给出了ADF7242所编译的应答帧的格式。序列号(SEQ NUM)是从RX_BUFFER中存储的帧复制而来。RX自动应答功能使用TX_BUFFER来存储所构建的应答帧，然后发送出去。在发送之前，应答帧将覆盖TX_BUFFER中存在的所有数据。

当响应数据请求MAC命令帧而发送应答帧时，所构建应答帧的FCF中的帧待定位内容由`auto_cfg.auto_ack_framepend`位定义。其它情况下，帧待定位位置0。

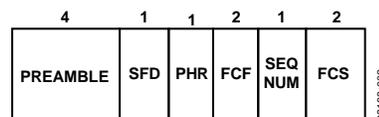


图2. ACK帧格式

ACK帧的传输开始于总延迟时间(寄存器`delaycfg1.tx_mac_delay`和寄存器`delaycfg2.mac_delay_ext`所指定的延迟时间之和)逝去之后。

`delaycfg1.tx_mac_delay`的默认设置为192，而`delaycfg2.mac_delay_ext`的默认设置为0，因此总延迟时间为192 μ s，适合使用非时隙CSMA-CA的网络。

或者，在寄存器`delaycfg1.tx_mac_delay`所指定的延迟时间消逝过程中，可以动态更新寄存器`delaycfg2.mac_delay_ext`。在使用时隙CSMA-CA的网络中，利用此选项可以使应答帧与倒退时隙边界精确对齐。

使能RX自动应答模式后，ADF7242将保持RX状态，直至接收到有效帧。如果使能了中断，当接收到有效帧时，则会产生`rx_pkt_rcvd`中断。ADF7242随后自动进入TX状态，直至应答帧传输完毕。如果使能了中断，则会产生`tx_pkt_sent`中断，表示发送阶段结束。然后，ADF7242返回到PHY_RDY状态。

TX自动非时隙CSMA-CA操作

自动CSMA-CA发射操作根据IEEE 802.15.4-2006标准关于非时隙CSMA-CA网络操作的规定，自动执行所有必要的步骤来发送帧，其中包括随机倒退的自动CCA重试、帧发送、应答帧的接收和发送失败时的自动重试。该器件部分支持时隙CSMA-CA操作。

表5. 固件模块提供的额外命令

命令	代码	描述
RC_CSMACA	0xC1	RCCM_IEEEX_R1模块载入PRAM后可用；启动CSMA-CA通道访问序列和帧传输

发送RC_CSMACA命令后，自动CSMA-CA发射序列启动。表5列出了命令详情。RC_CSMACA命令在固件模块成功下载到PRAM后可用。当ADF7242处于PHY_RDY状态时，该命令有效。它的使用方法与SPI命令相似。命令访问和状态字详情请参阅ADF7242数据手册。

命令RC_CSMACA是在命令RC_TX的基础上增加自动CSMA-CA通道访问序列和自动ACK验证的结果。CSMA-CA CCA重试次数通过寄存器auto_tx1.max_cca_retries指定；根据IEEE802.15.4-2006非时隙CSMA/CA网络操作标准，它必须在0到5范围内。设置auto_tx1.max_cca_retries = 7可禁用CSMA-CA程序，使得帧发送在MAC延迟逝去后立即开始。

这种配置有利于在使用时隙CSMA-CA的网络中实现该发射程序。此时，CCA操作的时序必须由用户MCU控制，寄存器auto_tx1.max_frame_retries的值必须设为1。

帧发送重试次数通过寄存器auto_tx1.max_frame_retries配置。它指定未应答或应答不正确的帧发送次数，达到该次数之后，无线电控制器取消操作，指示发生故障状况。

在发送TX_BUFFER中存储的帧之前，无线电控制器检查该帧FCF中的应答请求位是否置1。如果置1，则发送之后期望接收到应答帧。否则，帧发送完毕后，处理即结束。应答请求位是FCF字节的第5位，该字节所在的地址为txpb.tx_packet_base + 1。

图3显示了请求CSMA-CA阶段后(auto_tx1.max_cca_retries = 0 ... 5)的自动CSMA-CA TX程序。该程序通过RC_CSMACA命令启动。在ADF7242开始CSMA-CA阶段之前，由寄存器delaycfg0.rx_mac_delay和寄存器delaycfg2.mac_delay_ext共同定义的总RX MAC延迟必须逝去。

CSMA-CA阶段执行IEEE 802.15.4-2006非时隙CSMA-CA标准第7.5.1.4节所述的算法。这起始于ADF7242将第一个CCA推迟随机数量的倒退周期，各周期的标称长度为320 μs。最大倒退周期数由倒退指数BE根据 $2^{(BE-1)}$ 确定。倒退指数用寄存器auto_tx2.csma_min_be所含的值初始化。

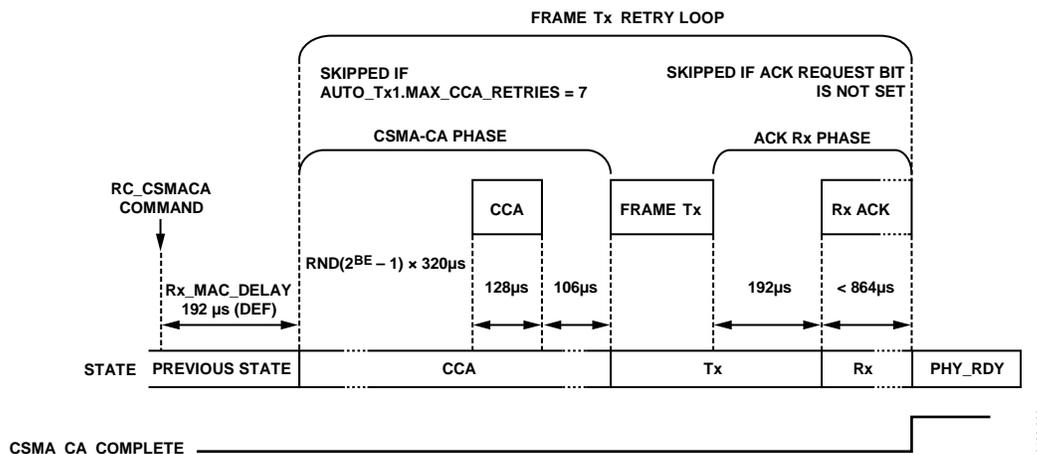


图3. 自动CSMA-CA TX操作(含CCA)

随机数由PRBS发生器产生。如果在CCA期间检测到通道繁忙，倒退指数BE将递增，直至达到寄存器auto_tx2.csma_max_be中配置的值为止。无线电控制器执行下一个延迟/CCA周期，直至达到寄存器auto_tx1.max_cca_retries中指定的最大CCA重试次数为止。如果已达到容许的最大CCA重试次数，操作将中止，状态为auto_status.auto_status = FAILURE_CSMACA。

如果CCA成功，无线电控制器将从CCA状态变为TX状态，并发送TX_BUFFER中存储的帧。如果发送帧的应答请求位和csma_ca_turnaround位均未置1，则一旦帧发送完成，无线电控制器即返回到PHY_RDY状态。

当auto_status.auto_status = SUCCESS时，该程序退出，并触发csma_ca_complete中断。否则，将进入RX状态。

如果发送帧中的应答请求位置1，则帧发送完成后，无线电控制器进入RX状态。在RX状态中，它等待有效的应答帧。如果在864 μs内没有收到应答帧，则无线电控制器检查是否已达到寄存器auto_tx1.max_frame_retries指定的最大帧重试次数。如果未达到，则无线电控制器仍然处于帧发送重试循环内，并且开始下一个CSMA-CA周期。如果已经达到最大帧发送重试次数，则程序退出到PHY_RDY状态，设置auto_status.auto_status = FAILURE_NOACK。

如果在RX状态有效期间收到应答帧，则无线电控制器将该应答帧所含的序列号与TX_BUFFER中存储的帧序列号进行比较。该序列号预期位于TX_BUFFER中的txpb.tx_packet_base + 3。如果序列号不匹配，并且尚未达到最大重试次数，则无线电控制器再次尝试发送。如果序列号匹配，则无线电控制器检查已收到应答帧中的帧待定位。如果帧待定位1，则程序退出到RX状态，设置auto_status.auto_status = SUCCESS_DATPEND。如果帧待定位未置1，则程序退出，状态设置为auto_status.auto_status = SUCCESS。如果csma_ca_turnaround位置1，则无线电控制器进入RX状态，否则进入PHY_RDY状态。

注意，应答帧会覆盖RX_BUFFER的内容。无论发送程序的结果成功与否，都会产生csma_ca_complete中断(如果使能)。仅当csma_ca_complete中断置位或无线电控制器状态字指示PHY_RDY状态时，auto_status.auto_status所含的状态字才有效。

通过适当的SPI命令，可以随时中止自动CSMA-CA TX操作。这种情况下，不会产生tx_pkt_sent中断，状态寄存器auto_status.auto_status处于未定义状态。

代码下载序列

PRAM共有8个页面，每个页面256字节。RCCM_IIIEEX_R1代码模块必须存储在PRAM中，从地址0x0000或页面0的地址0x00开始。当前PRAM页面通过寄存器prampg.pram_page选择。

下载到PRAM之前，必须将无线电控制器代码模块划分为与PRAM页面大小相当的多个256字节模块。利用SPI_PRAM_WR命令将每个256字节模块下载到当前选定的PRAM页面。

表6列出了与PRAM代码上传相关的命令。图4显示了将一个256字节的代码模块下载到PRAM页面所需的序列。第一步是配置当前PRAM页面。每写入一个256字节模块，页码必须递增。

然后，利用SPI_PRAM_WR命令将代码模块下载到选定的页面。SPI_PRAM_WR命令代码之后是地址字节0x00，以使代码模块与PRAM页面的基地址对齐。

图5显示了总体的下载序列。除了写入PRAM的最后一个页面以外，所有其它页面都必须用256字节的模块代码填充。

利用SPI_PRAM_RD命令可以读取程序RAM。它可以用来验证固件模块是否已经正确写入程序RAM。像SPI_PRAM_WR命令一样，主机MCU必须通过寄存器prampg.pram_page选择要读取的程序RAM页面。然后，主机MCU可以使用SPI_PRAM_RD命令(0x3E)以块读取方式读取所选的程序RAM页面。此命令的结构如图6所示。

表6. PRAM代码上传命令

命令	代码	描述
SPI_PRAM_WR	0x1E	将数据顺次写入当前选定的PRAM页面，prampg.pram_page从命令代码之后的地址开始。

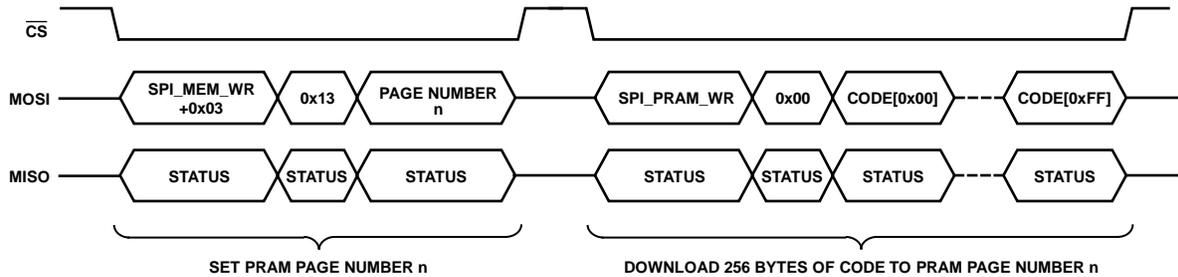


图4. PRAM页面的下载序列



图5. 代码模块的下载序列

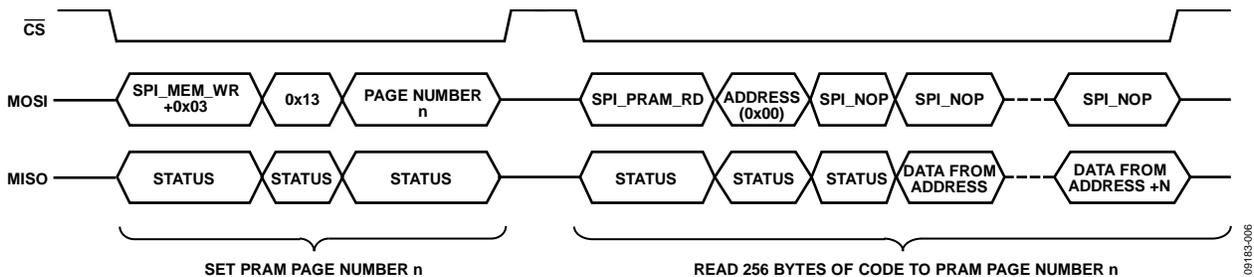


图6. PRAM页面的读取序列

更多信息

下载

用户可以在线下载[AN-1082 RCCM_IEEEX_R1 Code.zip](#)文件，其中包括本文提到的代码。

Copyright (c) Analog Devices, Inc.

保留所有权利

在满足下列条件的情况下，允许在修改后或不加修改地以源代码形式或二进制形式再分发和使用本软件：

- 再分发源代码时，必须保留上述版权声明、本条件列表和下述免责声明。
- 以二进制形式再分发时，分发文档和/或随附的其它资料中必须再现上述版权声明、本条件列表和下述免责声明。
- 无事先书面许可，不得使用ADI公司或其合作者的名义褒扬或推销本软件的衍生产品。
- 使用本软件可能会侵犯相关专利持有人的专利权。本许可并未免除本软件使用人从相关专利持有人获得单独许可的义务。

本软件由ADI公司按“原样”提供，并不包含任何明示或暗示的承诺，包括但不限于有关非侵权、适销性或适合特定用途的承诺。在任何情况下，ADI公司不对因使用本软件而导致的任何直接、间接、偶然、特殊、惩戒性的或继发性损害（包括但不限于：知识产权；采购替代商品或服务；使用、数据或利润损失；业务中断）负责，无论该损害适用何种责任理论（合同、严格责任或民事侵权行为，包括疏忽或其他原因），也无论ADI公司是否被告知存在此类损害的可能性。

参考文献

IEEE信息技术标准，第15.4部分：低速率无线个人局域网(WPAN)的无线媒体访问控制(MAC)和物理层(PHY)，IEEE标准802.15.4-2006。

注释