

高性能和超低功耗SUB-GHz射频收发器

特性:

- 频率范围：119至1050MHz.
 - ◆ 142至1050MHz (QX400/QX401/QX403).
 - ◆ 119至960MHz (QX404).
- 调制解调：OOK, (G)FSK, 4(G)FSK, (G)MSK.
- 数据率：100bps至1Mbps.
- 接收灵敏度：-126dBm.
- 支持PA：+27dBm/+30dBm.
- 最大输出功率：
 - ◆ +13dBm (QX400).
 - ◆ +16dBm (QX401).
 - ◆ +20dBm (QX403/04).
- TX发射工作电流：
 - ◆ +10dBm为18mA, +11dBm为20mA (QX400).
 - ◆ +13dBm为29mA, +14dBm为33mA (QX401).
 - ◆ 169MHz为70mA, 915MHz为85mA (QX403).
 - ◆ 915MHz为85mA (QX404).
- RX接收工作电流：10mA/13mA.
- 超低电流掉电模式：
 - ◆ Shutdown电流：30nA.
 - ◆ Standby电流：50nA.
- 优异的选择性性能：
 - 相邻通道干扰抑制：60dB.
 - 阻塞抑制(1MHz)：75dB.
- 支持快速唤醒和跳转时间.
- 内有自动频率控制 (AFC) 功能.
- 内有自动增益控制 (AGC) 功能.
- 内有天线分集和收发开关控制.
- 支持可配置的数据包处理程序.
- 4线SPI接口控制和64-Byte FIFOs.
- 内有低电池检测和温度传感器.
- 供给电压范围：1.8V至3.6V.
- 封装：QFN20.

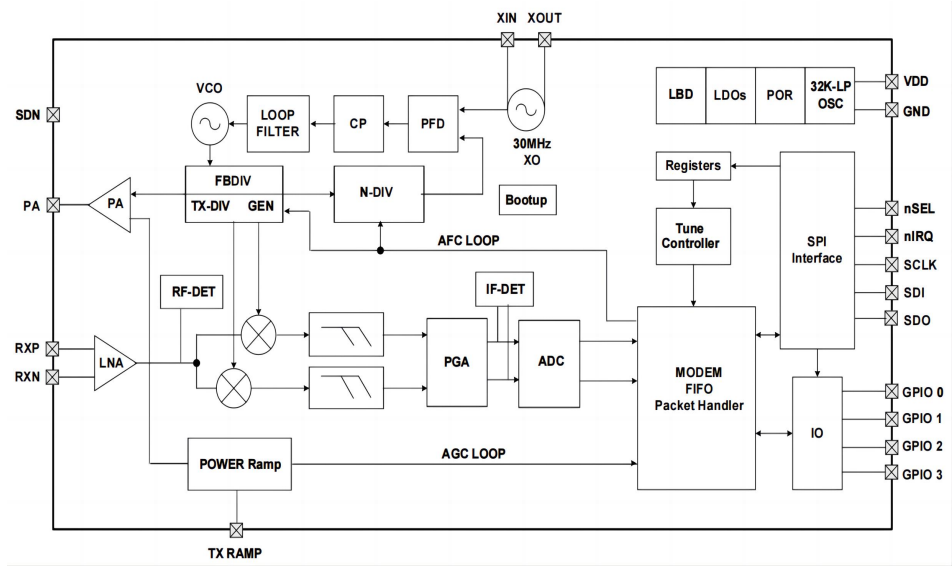
应用:

- 自动抄表.
- 家居安防及楼宇自动化.
- 家庭安全和报警器.
- 遥控及安防系统.
- 车库和闸门开启器.
- 遥控门锁.
- 工业控制.
- ISM波段数据通讯.
- 标签读写器.
- 监视器.

描述:

QX40x系列产品是一款高性能、超低电流的收发器,覆盖了119至1050MHz频率的无线应用OOK,(G)FSK,4(G)FSK,(G)MSK 四种调制解调方式的各类射频收发芯片,其产品包括一个完整的发射器,接收器和收发器.QX40x产品高集成度及简化系统设计所需的外围物料,为这些产品提供卓越的-126dBm接收灵敏度和高达+20dBm的发射功率,同时实现了极低的电流功耗.QX40x提供所有Sub-G频段的频率覆盖,它支持多种数据包格式及编解码方式,使得它可以满足各种应用的需求.另外QX40x还支持TX/RX 64Byte FIFO,丰富的GPIO端口及中断配置,通道侦听,高精度RSSI,低电压检测和温度传感,低频时钟输出,手动快速跳频等功能,使得应用设计更加灵活,实现产品差异化设计.QX40x的工作电压在1.8V至3.6V.QX40x产品当达到-126dBm灵敏度时仅消耗10mA电流,超低功耗接收模式可以进一步降低芯片的接收功率,QX40x包括最佳的相位噪声,阻塞和选择性性能的窄带应用,以及60dB相邻信道选择性与12.5kHz信道间距确保了在恶劣的射频条件下进行强大的接收功能产品.

内部功能框图：



推荐绝对最大额定值：

参数	符号	条件	最小	最大	单位
电源电压	V _{DD}		-0.3	3.6	V
接口电压	V _{IN}		-0.3	3.6	V
运行电源电压	V _{DD}		1.8	3.6	V
运行工作温度	°C		-40	+85	°C
RX输入功率	W		-	+10	dBm
ESD等级		持续至少30秒	-2	+2	KV
焊接温度	T _{SDR}	人体模型(HBM)	-	255	°C
热阻	θ _{JA}		-	30	°C/W
结温度	T _J		-40	+125	°C
存储温度	T _{STG}		-55	+150	°C

电气规格:

直流特性

参数	符号	条件	最小	典型	最大	单位
电源电压范围	VDD		1.8	3.3	3.6	V
节能模式电流	I _{Shutdown}	RC振荡器/主数字寄存器/低功耗数字寄存器关闭.	—	30	—	nA
	I _{Standby}	RC振荡器/主数字寄存器/WUT关闭.	—	50	—	nA
	I _{Sleep_RC}	RC振荡器/WUT打开时的所有区块和主数字寄存器关闭.	—	900	—	nA
	I _{Sleep_X0}	使用外部32khz晶体的睡眠电流.	—	2	—	μA
	I _{Sensor_LBD}	低电池检测器打开, 主寄存器和所有其他区块关闭.	—	1	—	μA
	I _{Ready}	RC振荡器和主数字寄存器打开, 所有其他区块关闭.	—	2	—	mA
调谐模式电流	I _{Tune_RX}	RX调谐和高性能模式.	—	7	—	mA
	I _{Tune_TX}	TX调谐和高性能模式.	—	8	—	mA
RX模式电流	I _{RX_H}	高性能模式.	—	13	—	mA
	I _{RX_L}	低功耗模式.	—	10	—	mA
TX模式电流 (QX403/04)	I _{TX_+20}	915MHz, +20dBm输出功率, 3.3V	—	85	—	mA
		460MHz, +20dBm输出功率, 3.3 V	—	75	—	mA
		169MHz, +20dBm输出功率, 3.3 V	—	70	—	mA
TX模式电流 (QX401)	I _{TX_+16}	868MHz, +16dBm输出功率, 3.3 V	—	43	—	mA
	I _{TX_+14}	868MHz, +14dBm输出功率, 3.3 V	—	37	—	mA
	I _{TX_+13}	868MHz, +13dBm输出功率, 3.3 V	—	29	—	mA
TX模式电流 (QX400)	I _{TX_+10}	868MHz, +10dBm输出功率, 3.3 V	—	18	—	mA

电气特性

参数	符号	条件	最小	典型	最大	单位
频率综合器范围 (QX400/01/03)	F_{SYN}		850	—	1050	MHz
			420	—	525	MHz
			284	—	350	MHz
			142	—	175	MHz
频率综合器范围 (QX404)	F_{SYN}		705	—	960	MHz
			353	—	479	MHz
			177	—	319	MHz
			119	—	159	MHz
频率综合器分辨率 (QX400/01/03)	$F_{\text{RES-960}}$	850-1050MHz	—	28.6	—	Hz
	$F_{\text{RES-525}}$	420-525MHz	—	14.3	—	Hz
	$F_{\text{RES-350}}$	283-350MHz	—	9.5	—	Hz
	$F_{\text{RES-175}}$	142-175MHz	—	4.7	—	Hz
频率综合器分辨率 (QX404)	$F_{\text{RES-960}}$	705-960MHz	—	28.6	—	Hz
	$F_{\text{RES-639}}$	470-639MHz	—	19.1	—	Hz
	$F_{\text{RES-479}}$	353-479MHz	—	14.3	—	Hz
	$F_{\text{RES-319}}$	235-319MHz	—	9.5	—	Hz
	$F_{\text{RES-239}}$	177-239MHz	—	7.1	—	Hz
	$F_{\text{RES-159}}$	119-159MHz	—	4.7	—	Hz
综合器设定时间	t_{LOCK}		—	50	—	μs
相位噪声		$\Delta F = 10\text{kHz}$, 460MHz	—	-106	—	dBc/Hz
		$\Delta F = 100\text{kHz}$, 460MHz	—	-110	—	dBc/Hz
		$\Delta F = 1\text{MHz}$, 460MHz	—	-123	—	dBc/Hz
		$\Delta F = 10\text{MHz}$, 460MHz	—	-130	—	dBc/Hz

接收器(RX)电气特性

参数	符号	条件	最小	典型	最大	单位
RX频率范围 (QX400/01/03)	F_{RX}		850	—	1050	MHz
			420	—	525	MHz
			284	—	350	MHz
			142	—	175	MHz
RX频率范围 (QX404)	F_{RX}		705	—	960	MHz
			353	—	479	MHz
			177	—	319	MHz
			119	—	159	MHz
RX灵敏度	$P_{RX_0.5}$	500bps, GFSK, BT=0.5, $\Delta f = \pm 250\text{kHz}$	—	-126	—	dBm
	P_{RX_40}	40kbps, GFSK, BT=0.5, $\Delta f = \pm 20\text{kHz}$	—	-110	—	dBm
	P_{RX_100}	100kbps, GFSK, BT=0.5, $\Delta f = \pm 50\text{kHz}$	—	-106	—	dBm
	P_{RX_125}	125kbps, GFSK, BT=0.5, $\Delta f = \pm 62.5\text{kHz}$	—	-105	—	dBm
	P_{RX_500}	500kbps, GFSK, BT=0.5, $\Delta f = \pm 250\text{kHz}$	—	-97	—	dBm
	$P_{RX_9.6}$	9.6kbps, 4GFSK, BT = 0.5, $\Delta f = \pm 2.4\text{kHz}$	—	-110	—	dBm
	P_{RX_1M}	1Mbps, 4GFSK, BT = 0.5, dev=83.3 kHz	—	-88	—	dBm
	P_{RXOOK}	4.8kbps, 350 kHz BW, OOK, PN15 data	—	-110	—	dBm
		40kbps, 350 kHz BW, OOK, PN15 data	—	-104	—	dBm
		120kbps, 350 kHz BW, OOK, PN15 data	—	-99	—	dBm
RX通道带宽	BW		1.1	—	850	kHz
BER变量与功率等级	P_{RX_RES}	Up to +5 dBm Input Level	—	0	0.1	ppm
RSSI分辨率	RES_{RSSI}		—	± 0.5	—	dB

接收器(RX)电气特性（续1）

参数	符号	条件	最小	典型	最大	单位
169MHZ选择性偏移	C/I _{1-CH}		—	-60	—	dB
450MHZ选择性偏移	C/I _{1-CH}		—	-58	—	dB
868/915MHZ选择性偏移	C/I _{1-CH}		—	-53	—	dB
阻塞偏移(1MHz)	1M _{Block}		—	-75	—	dB
阻塞偏移(8MHz)	8M _{Block}		—	-84	—	dB
镜像抑制	Im _{REJ}		—	35	—	dB
			—	55	—	dB

发送器 (TX) 电气特性

参数	符号	条件	最小	典型	最大	单位
TX频率范围 (QX400/01/03)	F_{TX}		850	—	1050	MHz
			420	—	525	MHz
			284	—	350	MHz
			142	—	175	MHz
TX频率范围 (QX404)	F_{TX}		705	—	960	MHz
			353	—	479	MHz
			177	—	319	MHz
			119	—	159	MHz
(G)FSK数据率	DR_{FSK}		0.1	—	500	kbps
4(G)FSK数据率	DR_{4FSK}		0.2	—	1000	kbps
OOK数据率	DR_{OOK}		0.1	—	120	kbps
调制偏差范围 (QX400/01/03)	Δf_{960}	850-1050MHz	—	1.5	—	MHz
	Δf_{525}	420-525MHz	—	750	—	kHz
	Δf_{350}	283-350MHz	—	500	—	kHz
	Δf_{175}	142-175MHz	—	250	—	kHz
调制偏差范围 (QX404)	Δf_{960}	705-960MHz	—	1.5	—	MHz
	Δf_{479}	353-479MHz	—	750	—	kHz
	Δf_{319}	235-319MHz	—	500	—	kHz
	Δf_{239}	177-239MHz	—	375	—	kHz
	Δf_{159}	119-159MHz	—	250	—	kHz

发送器(TX)电气特性(续1)

参数	符号	条件	最小	典型	最大	单位
调制偏差分辨率 (QX400/01/03/04)	F _{FRES-1050}	850-1050MHz	—	28.6	—	Hz
	F _{FRES-525}	420-525MHz	—	14.3	—	Hz
	F _{FRES-350}	283-350MHz	—	9.5	—	Hz
	F _{FRES-175}	142-175MHz	—	4.7	—	Hz
调制偏差分辨率 (QX404)	F _{FRES-960}	705-960MHz	—	28.6	—	Hz
	F _{FRES-479}	353-479MHz	—	14.3	—	Hz
	F _{FRES-319}	235-319MHz	—	9.5	—	Hz
	F _{FRES-239}	177-239MHz	—	7.1	—	Hz
	F _{FRES-159}	119-159MHz	—	4.7	—	Hz
输出功率范围 (QX403/04)	P _{TX}		-20	—	+20	dBm
输出功率范围 (QX401)	P _{TX61}		-40	—	+16	dBm
输出功率范围 (QX400)	P _{TX60}		-40	—	+13	dBm
TX RF输出步进	P _{STEP}		—	0.1	—	dB
TX RF不同温度 下输出电平变化	P _{RF-TEMP}	-40 至 +85°C	—	1	—	dB
TX RF不同频率 下输出电平变化	P _{RF_FREQ}	测量范围为902-928MHz	—	0.5	—	dB
发送调制滤波系数	BT		—	0.5	—	—

辅助电气规格

参数	符号	条件	最小	典型	最大	单位
传感器温度	T _S		—	4.5	—	°C
低电池检测分辨率			—	50	—	mV
时钟输出频率范围	F _{MC}		32.768K	—	F _{xtal}	Hz
传感器转换时间			—	3	—	ms
XTAL频率范围			25	—	32	MHz
30MHz启动时间	T _{30M}		—	250	—	μs
30MHz上限分辨率			—	70	—	fF
32kHz启动时间	T _{32k}		—	2	—	sec
32KHzRC精度			—	2500	—	ppm
POR复位时间	T _{POR}		—	—	5	ms

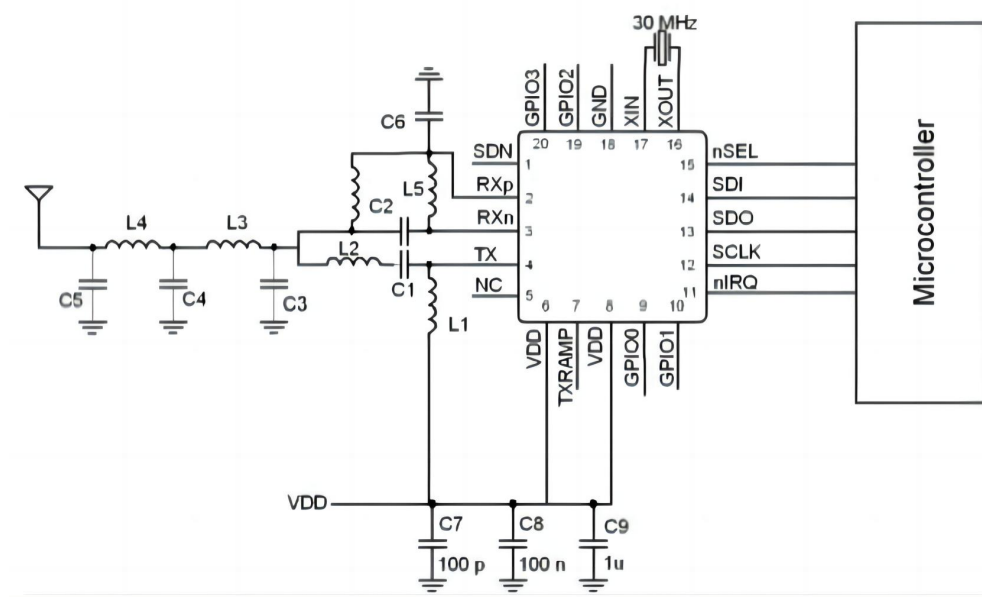
数字接口电气规格（GPIO、SCLK、SDO、SDI、nSEL、nIRQ、SDN）

参数	符号	条件	最小	典型	最大	单位
上升时间	T_{RISE}	$0.1 \times V_{DD}$ 至 $0.9 \times V_{DD}$ DRV<1:0>= HH	—	2.3	—	ns
下降时间	T_{FALL}	$0.9 \times V_{DD}$ 至 $0.1 \times V_{DD}$ DRV<1:0>= HH	—	2	—	ns
输入电容	C_{IN}		—	2	—	pF
高电平输入电压	V_{IH}		$V_{DD} \times 0.7$	—	—	V
低电压输入电压	V_{IL}		—	—	$V_{DD} \times 0.3$	V
输入电流	I_{IN}	$0 < V_{IN} < V_{DD}$	-10	—	10	μA
激活上拉时的输入电流	I_{INP}	$V_{IL}=0V$	1	—	10	μA
输出低电平的驱动强度	I_{OmaxLL}	DRV[1:0]= LL	—	6.66	—	mA
	I_{OmaxLH}	DRV[1:0]= LH	—	5.03	—	mA
	I_{OmaxHL}	DRV[1:0]= HL	—	3.16	—	mA
	I_{OmaxHH}	DRV[1:0]= HH	—	1.13	—	mA
输出高电平的驱动强度	I_{OmaxLL}	DRV[1:0]= LL	—	5.75	—	mA
	I_{OmaxLH}	DRV[1:0]= LH	—	4.37	—	mA
	I_{OmaxHL}	DRV[1:0]= HL	—	2.73	—	mA
	I_{OmaxHH}	DRV[1:0]= HH	—	0.96	—	mA
GPIO0输出高电平的驱动强度	I_{OmaxLL}	DRV[1:0]= LL	—	2.53	—	mA
	I_{OmaxLH}	DRV[1:0]= LH	—	2.21	—	mA
	I_{OmaxHL}	DRV[1:0]= HL	—	1.7	—	mA
	I_{OmaxHH}	DRV[1:0]= HH	—	0.80	—	mA
逻辑高电平的输出电压	V_{OH}	DRV[1:0]= HL	$V_{DD} \times 0.8$	—	—	V
逻辑低电平的输出电压	V_{OL}	DRV[1:0]= HL	—	—	$V_{DD} \times 0.2$	V

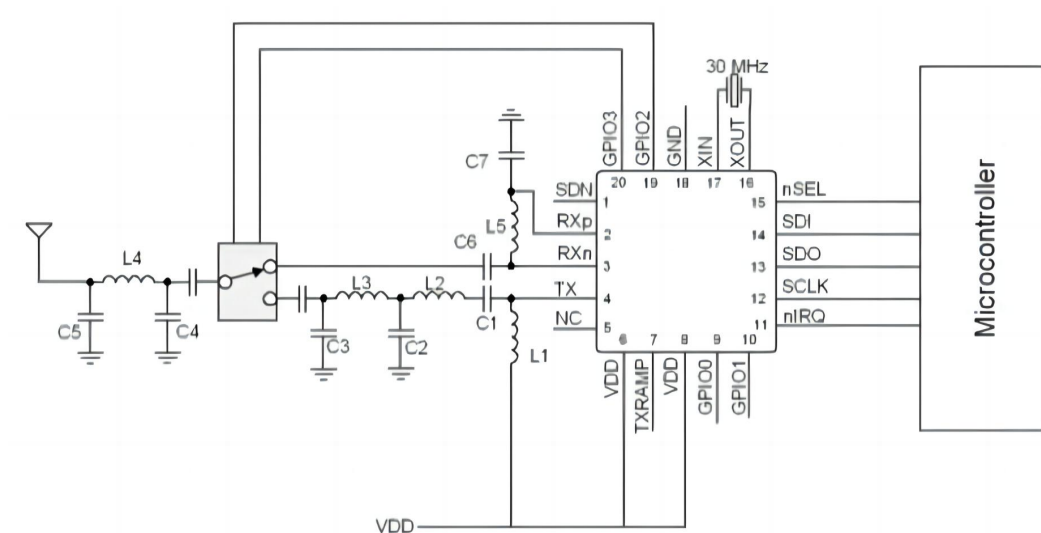
功能描述

QX40x系列设备是高性能、低电流、无线ISM收发器,覆盖全Sub-GHz频段,工作电压范围为1.8-3.6V和低电流功耗.QX40x系列产品作为发射器,接收器,收发器使用,该系列设备可以交替传输和接收数据包,该设备使用单转换混频器,将2/4电平FSK/GFSK或OOK调制的接收信号下转换为低中频频率,在可编程增益放大器(PGA)之后,信号通过一个高性能的ADC转换为数字区域,允许在内置的DSP中执行滤波、解调、和数据包处理,与基于模拟的架构相比,提高了接收器的性能和灵活性,解调后的信号通过一个可编程的GPIO,或通过读取64字节的RX FIFO,通过标准的SPI总线输出到系统单片机,由于发射机和接收机不同时工作,因此有一个单一的高精度局部振荡器(LO)用于发射和接收模式,该LO是由一个集成的VCO和Fractional-N PLL生成综合器.该综合器设计可以支持从100bps到1Mbps的可配置数据速率.QX400/01/03产品可在142-175、283-350、420-525和855-1050MHz的频段内工作,最大频率精度步长为28.6Hz.QX404在QX400/01/03产品不支持的频段内提供频率覆盖,传输FSK数据直接调制到数据流中,可以通过低通滤波器形成,QX403/04包含一个功率放大器(PA),支持输出功率高达+20dBm的效率,在169MHz仅功耗70mA,在915MHz仅功耗85mA.集成的+20dBm功率放大器也用于补偿成本较低,性能较低的天线或由于尺寸限制而导致的性能下降,这样才能实现类似的性能.QX401提供的输出功率高达+16dBm.QX400电流功耗低于18mA的+10dBm输出功率.QX400和QX401有两种匹配,E类和切换电流,E类匹配提供了最佳的电流功耗,而开关电流匹配在改变电池电压和温度和略高的电流功耗下显示最好的性能,PA是单端的,允许天线匹配和较低的成本,PA包括自动上升和下降控制,以减少不必要的光源扩展.QX40x系列支持跳频,TX/RX开关控制,和天线分流开关控制,以提高性能.内置的天线分集和跳频可以进一步扩展范围和提高性能,天线多样性已完全集成到QX40x产品中,可以将系统链提高8-10dB,从而在不利的环境条件下大幅增加范围,一个高度可配置的包处理程序允许自动编码/解码,附加的系统功能,如自动唤醒定时器,低电池检测器,64字节TX/RX FIFOs,和前置码检测,减少总电流功耗,并允许使用更低成本的系统MCU.一个集成的温度传感器、电源复位(POR)和GPIOs进一步降低了整个系统的成本.图中所示的应用程序大多数输出功率小于17dBm使用此配置,图中所示的应用程序使用外部T/R开关的+20dBm的使用此配置.

典型应用原理图：



典型QX401应用线路图

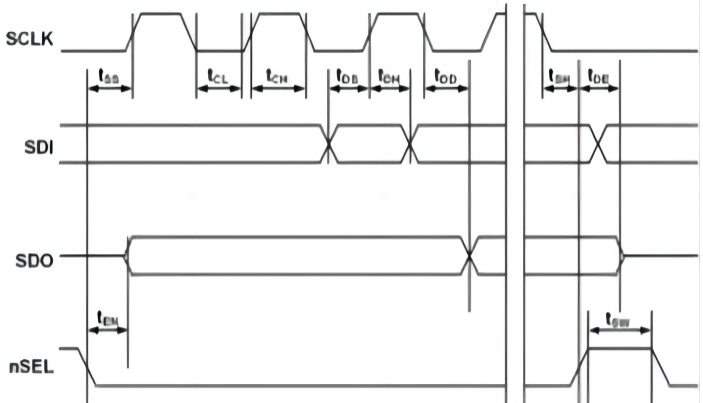


典型QX403单天线与射频开关转换线路图

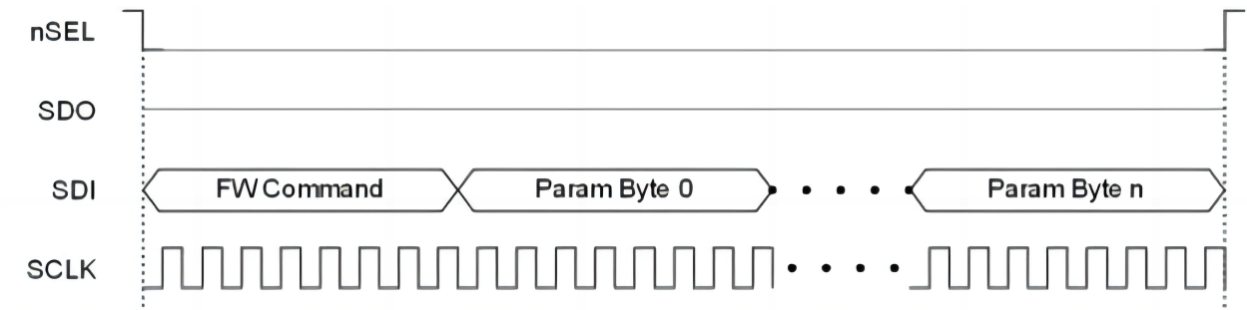
控制器接口

串行接口（SPI）

QX40x通过标准的4线串行外围接口（SPI）与主机模块进行通信：SCLK、SDI、SDO和nSEL.SPI接口设计为最大10MHz。SPI串行时序参数见图. 主机MCU将数据写入SDI引脚，并可以在SDO输出引脚上从设备中读取数据.图中演示了一个SPI写入命令.nSEL引脚应变低以启动SPI指令.SDI数据的第一个字节将是一个固件命令，然后是n个字节的参数数据，它将根据具体命令而变化,SCLK的上升边缘应该与SDI数据的中心对齐。

符号	参数	最小值 (ns)	示意图
t_{CH}	高时钟时间	40	
t_{CL}	低时钟时间	40	
t_{DS}	设置数据时间	20	
t_{DH}	保持数据时间	20	
t_{DD}	数据输出延迟时间	20	
t_{EN}	启用输出时间	20	
t_{DE}	禁用输出时间	50	
t_{SS}	选择设置时间	20	
t_{SH}	选择停止时间	50	
t_{SW}	选择高周期	80	

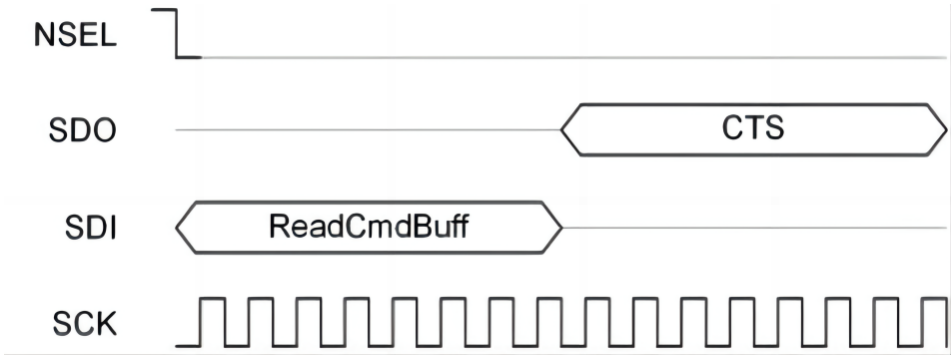
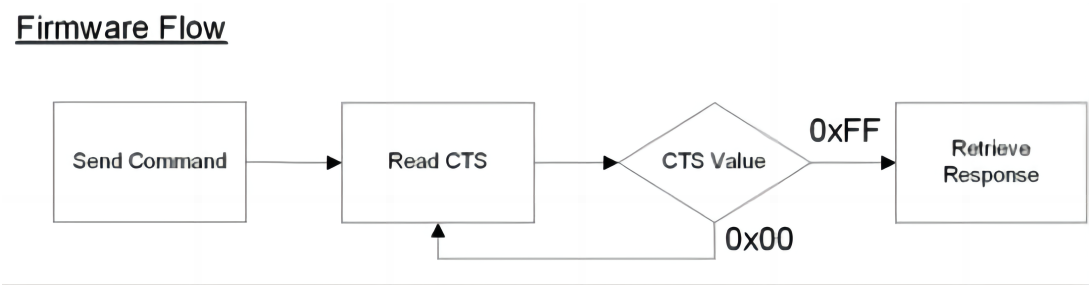
串行接口时序参数



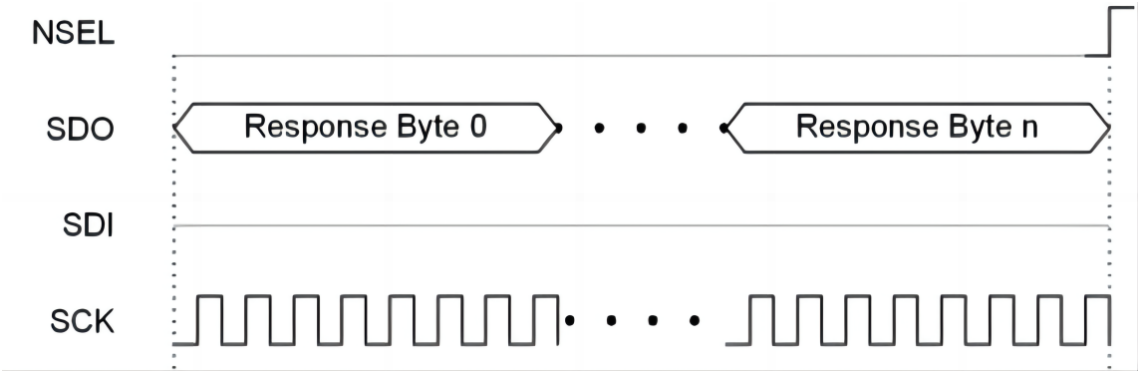
SPI写入命令

QX40x包含一个内部单片机,它控制无线电的所有内部功能.对于SPI读取命令,使用核查从清除至发送 (CTS)流来确保内部MCU已执行命令并准备通过SDO引脚输出的数据.图中演示了一个SPI读取命令的一般流程,一旦CTS值读取FFh,那么读取的数据输出到主机MCU,一个有效的FFh CTS读取的典型时间为20us,图中演示了将CTS设置为FFh后的剩余读取周期,内部单片机将锁定负边的SDO数据,以便主机单片机处理SCLK上升边的SDO数据。

Firmware Flow



SPI Read命令和检查CTS值



SPI Read命令和锁定读取数据

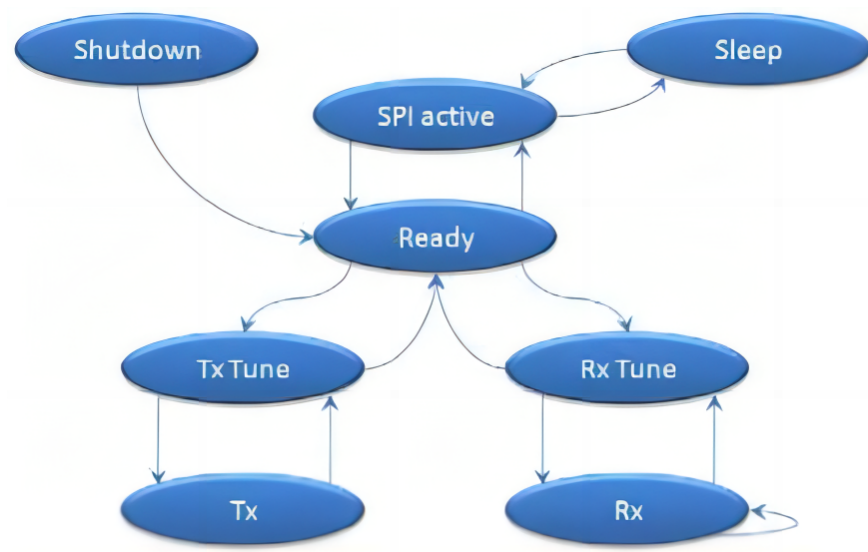
快速响应寄存器

快速响应寄存器是可以立即能够读取的寄存器,而不需要监视和检查CTS,它有四个快速响应寄存器,可以为一个特定的功能编程,快速响应寄存器可以读取API命令,0x50快速响应为A,0x51快速响应为B,0x53快速响应为C,0x57快速响应为D,快速响应寄存器可以通过FRR_CTL_X_MODE属性进行配置.

快速响应寄存器可以以异常的方式读取,在最初的16个时钟周期之后,每额外的8个时钟周期将以循环方式发出下一个快速响应寄存器的内容,除非切换了nSEL,否则FRRs的值将不会被更新.

操作模式和定时

QX40x的主态如图中所示,关闭状态指的是完全关闭无线电,以减少电流消耗,Standby, Sleep, SPI Active, Ready, TX_Tune 和 RX_Tune 可以优化应用程序对RX/TX的当前消耗和响应时间,API命令START_RX, START_TX 和 CHANGE_STATE控制操作状态,但关机是由SDN引脚1控制,表中显示了每种操作模式,以及达到RX或TX模式所需的时间,以及每种模式的当前消耗量,表中的时间是从nSEL的上升边缘到芯片处于所需状态的测量时间,这些时间表明了状态转换时间,但不能保证,只能用作参考数据点,自动测序器将芯片从任何状态放入RX或TX,没有必要手动进入这些状态,为了简化图,它没有显示,但任何低功率状态可以自动返回RX或TX.



状态图

运行状态响应时间和电流消耗量

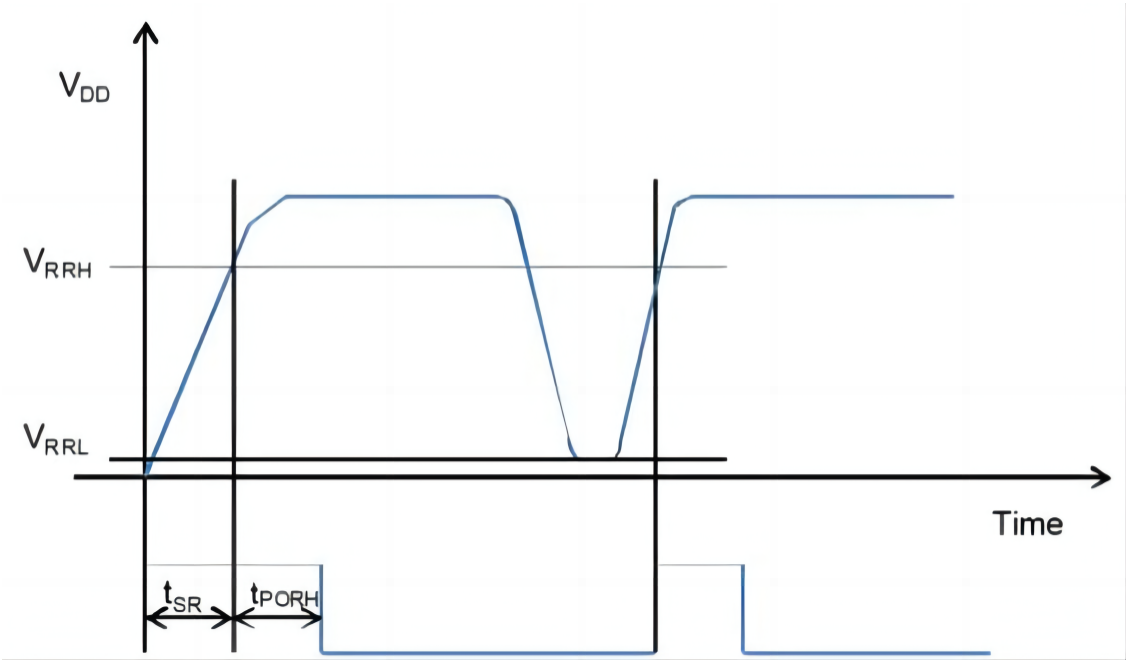
状态模式	响应时间		当前状态 / 模式
	TX	RX	
关闭状态	15 ms	15 ms	30 nA
待机状态	440 μs	440 μs	50 nA
睡眠状态	440 μs	440 μs	900 nA
SPI激活状态	340 μs	340 μs	1.35 mA
就绪状态	126 μs	122 μs	1.8 mA
TX调谐状态	58μs	—	8 mA
RX调谐状态	—	74μs	7.2 mA
TX状态	—	138μs	18mA @+10 dBm
RX状态	130μs	75μs	10 or13 mA

***注意：如果使用零干扰模式，TX→RX和RX→TX状态转换时间可以减少到70μs。**

图中显示了POR定时和电压要求,功耗(电池寿命)取决于应用程序的工作周期或部件在RX或TX状态中的工作频率,在大多数应用程序中,待机状态的使用将对电池寿命最有利,但对于非常低的占空比应用程序,关机电将有一个优势,为了获得最快的时间选择,可以在START_RX 或 START_TX API命令中选择下一个状态,以最小化SPI控制和内部MCU处理.

重置电源（POR）

通电复位（POR）序列用于将设备从完全关闭或关闭状态上启动,要执行这个过程,VDD在1ms内响应,并且必须在设备上保持应用至少10ms,如果VDD被移除,它必须在低于0.15V下再应用,详见下图和表中。



POR定时图

POR定时表

变量	描述	最小	典型	最高	单位
t_{PORH}	VDD到完全设置POR电路的最高时间	10			ms
t_{PORL}	VDD启用POR的最底时间	10			ms
V_{RRH}	POR的工作电压	90%*Vdd			V
V_{RRL}	POR工作时的启动电压	0		150	mV
t_{SR}	POR工作时电源转换速率			1	ms

关闭状态

关机状态是小于30nA时设备的最低电流消耗状态,可通过抬高SDN引脚来进入关闭状态,除关闭状态外,所有状态下SDN引脚应保持低电平,在关闭状态下,寄存器的数据将丢失,并且SPI没有访问,退出关闭状态时,将启动电源复位(POR),然后再次降低,以便内部电容器可以放电,在这段时间内不保持SDN高位可能会导致POR丢失和设备启动错误,如果不能满足POR定时和电压要求,强烈建议使用主机处理器来控制SDN.

待机状态

待机状态除关机外,它的电流消耗最低,但对RX或TX模式的响应时间要快得多,在大多数情况下,待机应作为低功率状态,在这种状态下,将维护寄存器值,并禁用所有其他区块,在此模式下,SPI均可访问,但任何SPI操作,包括FIFO R/W,都将启用内部启动振荡器,并自动将部件移动到SPI激活状态,在一个SPI操作后,主机将需要通过“更改状态”API重新命令设备回到待机状态,以实现50nA的当前消耗,如果发生了中断(即nIRQ引脚=0),则必须读取中断寄存器,以达到该模式的最小电流消耗.

睡眠状态

睡眠状态与待机状态相同,但已启用了唤醒定时器和32kHz时钟源,32kHz时钟的源可以是周期性校准的内部32kHz RC振荡器,也可以是使用外部XTAL的32kHz振荡器,在此模式下,SPI可访问,但SPI操作将启用内部启动振荡器,并自动将部件移动到SPI激活模式,SPI操作后,主机需要重新命令设备恢复睡眠状态,如果发生了中断(即nIRQ引脚=0),则必须读取中断寄存器,以达到该模式的最小电流消耗.

SPI激活状态

在SPI激活状态下,SPI和启动振荡器,在待机或休眠期间的SPI操作处理后,设备将不会自动返回到这些状态,需要“更改状态”API命令返回待机或休眠模式.

就绪状态

就绪状态被设计为在合理的电流消耗下提供一个快速过渡到TX或RX状态的时间,在这种模式下,晶体振荡器仍然被启用,通过消除晶体启动时间来减少切换到TX或RX模式所需的时间.

TX状态

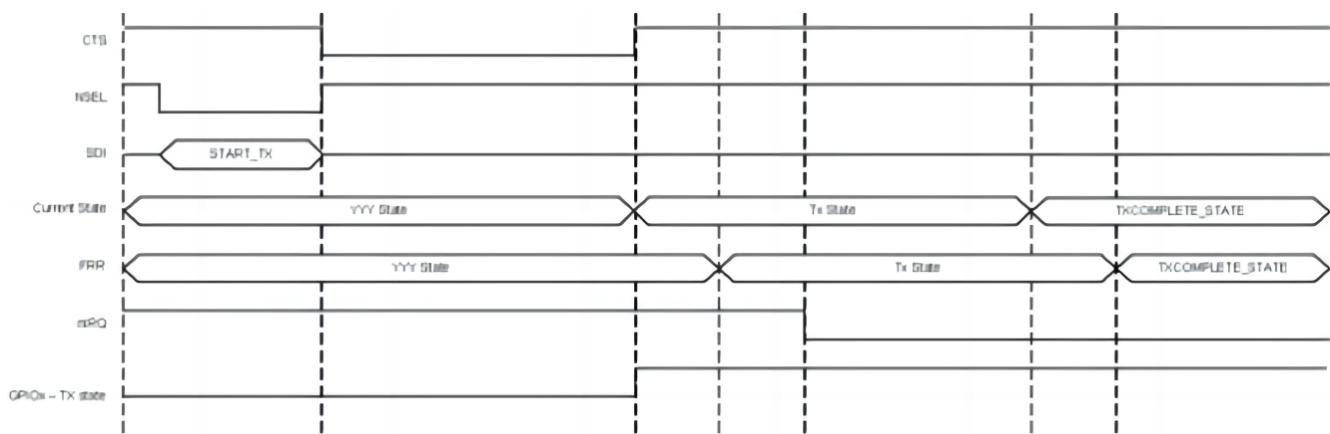
TX状态可以通过“开始TX”或“更改状态”API命令从任何状态输入,一个内置的测序器负责所有需要转换的行动,从使晶体振荡器到提高PA,当从待机状态转到TX状态时,将自动发生以下事件序列.

- 1.启用内部IDOs.
- 2.启动晶体振荡器,等待准备就绪.
- 3.启用PLL.
- 4.校准VCO/PLL.

- 5.等待打开，直到PLL稳定到所需的发射频率。
- 6.激活功率放大器，并等待功率提升完成。
- 7.传输数据包。

根据芯片在命令到TX之前配置的状态，可以消除此顺序中的步骤，默认情况下，每次启用PLL时，都会校准VCO和PLL，当使用START_TX API命令时，可以定义下一个状态，以确保最佳的时间和周期。

图中显示了START_TX的命令和定时的示例，一旦测序器将器件进入TX状态，CTS就会变高，由于排序器正在处理上面列出的事项，CTS将很低，不允许新的命令或属性更改，如果使用快速响应(FRR)或nIRQ来监视当前状态，那么从FRR或nIRQ上实际发生事项到发生转换时，内部器件将会有轻微的延迟，从进入TX状态到FRR将更新的时间为 $5\mu s$ ，到nIRQ将转换的时间为 $13\mu s$ ，如果一个GPIO被编程为TX状态或作为发射/接收开关(TR开关)的控制，则没有延迟。



Start TX命令和时间

RX状态

RX状态可以通过使用“Start RX”或“Change State” API命令从任何其他状态中输入该状态，内置排序器负责处理状态之间转换所需的所有操作，当从待机状态到RX state时，将自动产生以下事项序列，使芯片进入RX模式：

- 1.启用数字IDO和模拟IDOs。
- 2.启动晶体振荡器，等待准备就绪。
- 3.启用PLL。
- 4.校准VCO。
- 5.等待PLL稳定到所需要的接收频率。
- 6.启用接收器电路：LNA，混频器和ADC。
- 7.启用在数字调制解调器中接收模式。

根据无线电的配置，数字调制解调器将自动执行以下所有或部分功能：AGC，AFC(可选)，更新状态寄存器，bit同步，数据包处理(可选)，包括同步字，报头检查和CRC，与TX状态类似，RX之后的下一个状态可以在“Start RX” API命令中定义RX之后的状态，START_RX命令和时间将等同于图中所示的时间。

应用程序设计接口(API)

在设备内嵌入了一个主机单片机将与之通信的应用程序编程接口(API),该API可分为两个部分:命令和属性.这些命令用于控制芯片和检索其状态.

中断(INT)

QX40x能够在某些事项发生时产生中断信号,芯片通过设置nIRQ输出引脚LOW = 0通知微控制器发生中断事项,当任何一个(或多个)中断事项发生时,将产生此中断信号,nIRQ引脚将保持在较低水平,直到微控制器读取中断状态寄存器,然后,nIRQ输出信号将被重置,直到检测到下一个状态变化.

中断源被分为三组:数据包处理程序,芯片状态和调制解调器,这些组中的单个中断可以在中断属性寄存器,0101,0102和0103中被启用/禁用,必须启用一个中断,这样它才能触发nIRQ引脚上的事项,必须启用中断组以及API属性0100中的各个中断.

编号	命令	描述
0x20	get_int_status	返回中断状态--数据包处理程序,调制解调器和芯片.
0x21	get_ph_status	返回数据包处理程序的状态.
0x22	get_modem_state	返回调制解调器的状态字节.
0x23	get_chip_state	返回芯片状态.

编号	属性	默认值	描述
0x0100	int_ctl_enable	0x04	PH,调制解调器和芯片的启用中断组.
0x0101	int_ctl_ph_enable	0x00	数据包处理程序中断启用属性.
0x0102	int_ctl_modem_enable	0x00	调制解调器中断启用属性.
0x0103	int_ctl_chip_enable	0x04	芯片中断启用属性.

一旦产生了中断事项,并且nIRQ引脚在低位,就有两种方法可以读取和清除中断,可以在“GET_INT_STATUS”API命令中读取和清除所有的中断,默认情况下,所有中断一旦读取就将被清除,如果只希望特定的中断以尽可能快的方法读取,则单个中断组(包处理程序,芯片状态,调制解调器)可以被“GET_MODEM_STATUS”、“GET_PH_STATUS”(包处理程序)和“GET_CHIP_STATUS”API命令读取和清除.

如果该特定功能的中断被启用或禁用,则可以读取该特定功能的瞬时状态,状态结果在中断程序后提供,并且可以使用与中断程序相同的命令进行读取,状态栏将给出函数是否启用中断的当前状态,快速响应寄存器也可以提供关于中断组的信息,但读取快速响应寄存器将不会清除中断并重置nIRQ引脚.

通用输入输出(GPIO)

四个通用的IO引脚可用于该应用程序中,GPIO由地址为13h中的GPIO_PIN_CFG命令配置,有关GPIO选项的完整列表,请参见API指南,GPIO引脚0和1应用于激活信号,如数据或时钟,GPIO引脚2和3比引脚0和1更容易在综合器中产生虚假物,GPIOs的驱动强度可以通过GPIO_PIN_CFG命令中的GEN_CONFIG参数进行调整,默认情况下,驱动器强度被设置为最小值,GPIO的默认配置和SDN期间的状态如下表中所示,关闭期间的IO状态也显示在表中.

引脚	SDN状态	POR默认值
GPIO0	0	POR
GPIO1	0	CTS
GPIO2	0	POR
GPIO3	0	POR
nIRQ	VDD上拉电阻	nIRQ
SD0	VDD上拉电阻	SD0
SDI	Z设为高	SDI

GPIO表

调制和硬件配置选项

QX40x支持不同的调制选项,并可以在各种配置中使用,以使设备适应任何特定的应用程序进行更换,调制和配置选项将在API属性在MODEM_MOD_TYPE中设置。

调制模式类型

- 调制类型
 - 该特性选择了OOK、FSK、4FSK和GFSK调制、调制源和TX直接模式控制。
 - 调制器必须通过整个数据包被配置为一种模式.如果部分数据包在FSK和4FSK模式之间交替，调制解调器应该被编程为4FSK模式。
- 属性：0X2000
- 默认：0X02
- 设置：
 - TX直通模式TYPE,默认为0。
0=直通模式在同步模式下运行,仅适用于TX。
1=直通模式在异步模式下运行,仅适用于TX,不支持GFSK。
 - TX直通模式GPIO[2:0],默认为0X0。
0 = TX直通模式使用GPIO0作为数据源，仅适用于TX。
1 = TX直通模式使用GPIO1作为数据源，仅适用于TX。
2 = TX直通模式使用GPIO2作为数据源，仅适用于TX。
3 = TX直通模式使用GPIO3作为数据源，仅适用于TX。
 - 调制源模式[1:0],默认为0X0。
0=调制源是数据包处理程序FIFO。
1=调制源为直通模式引脚。
2=调制源为伪随机发生器。
 - 模式类型[2:0]-默认为0X2
0= CW
1= OOK
2= 2FSK
3= 2GFSK
4= 4FSK
5= 4GFSK

■ 配置图

modem_mod_type							
7	6	5	4	3	2	1	0
tx_direct_mode_type	tx direct mode gpio [1:0]		MOD_SOURCE[1:0]		MOD_TYPE[2:0]		
0	0x0		0x0		0x2		

调制类型

QX40x支持五种不同的调制选项：GFSK、FSK、4GFSK、4FSK和OOK，MSK可以通过使用GFSK设置来创建，GFSK是推荐的调制类型，它提供了最好的性能和最干净的调制频谱，调制类型由“MODEM_MOD_TYPE”API属性中的“MOD_TYPE[2: 0]”寄存器设置，也可以选择连续波(CW)载波。

硬件配置选项

有不同的接收解调器选项来优化性能，以及RX/TX数据如何从主机MCU传输到RF设备。

接收调制器选项

该设备中集成了多个解调器，以优化针对不同应用程序，调制格式和数据包结构的性能，WDS中内置的计算器将根据输入标准来选择最优解调器。

同步解调器

同步解调器的内部频率误差估计器基于101010前导结构获取频率误差。比特时钟恢复电路在“10”或“01”位的四个锁定到传入的数据流，同步解调器为调制指数小于2的4FSK或GFSK调制提供了最佳性能。

异步解调器

异步解调器应在以下一个或多个条件下使用OOK调制和FSK/GFSK/4GFSK：

- 调制指数 ≥ 2
- 非标准序列 (not 1010101...)

当调制指数超过2时，异步解调器比同步解调器具有更好的灵敏度，内部电路提供的数据输出和数据时钟信号，以简化与主机的接口。

RX/TX数据接口

有两种不同的选项可以将数据从射频设备传输到主机单片机，FIFO模式使用SPI接口传输数据，而直通模式通过GPIO实时传输数据。

FIFO模式

在FIFO模式下，发射和接收数据被存储在集成的FIFO寄存器存储器中，TX FIFO是通过写入命令66h，然后通过主机写入TX FIFO的数据和时钟来访问TX FIFO，RX FIFO是通过写入命令77h，而主机从RX FIFO中读出的数据来访问时钟周期数，RX数据将被锁定到SDO引脚上。在TX模式下，如果启用了包处理程序，则存储在FIFO存储器中的数据字节与其他字段和信息字节一起“打包”，以构建最终的传输包结构，这些段包括序言、同步字节、CRC校验等。在TX模式下，包结构的配置由自动包处理程序决定，并结合各种包处理程序属性。如果自动数据包处理程序被禁用，整个所需的包结构应该被加载到FIFO内存中，其他字段将不会自动添加到存储的字节中FIFO内存上。在RX模式下，只有被认为是“数据字节”的接收到的数据包的字节会被存储在FIFO内存中，接收到的这些字节被视为“数据字节”，由自动包处理程序与包处理程序配置一起确定。如果禁用了自动数据包处理程序，则同步字符之后的所有字节都被视为数据字节，并存储在FIFO内存中。因此即使不需要自动数据包处理操作，也仍然需要编程前导码检测阈值和同步字节，以便RX调制解调器知道何时开始向FIFO中填充数据。当FIFO在RX模式下使用时，通过正确地编程GPIO引脚为RX数据输出引脚，仍然可以直接（实时）观察到所有接收到的数据，这在应用程序开发过程中非常有用。在FIFO模式下，当发生PACKET_SENT或PACKET_RX中断发生时，芯片将自动退出TX或RX状态。芯片将返回到“start TX”或“start RX”API命令、TX COMPLETE_STATE[3: 0]或RX VALID_STATE[3: 0]参数中编程的IDLE状态。例如，通过发送“start TX”命令并将30h写入TX COMPLETE_STATE[3: 0]参数，可以将芯片置于TX模式中。芯片将传输FIFO的所有内容，并发生ipk发送中断，当发生时，芯片将返回到TX COMPLETE_STATE[3: 0] = 30h定义的就绪状态。

直通模式

对于在主机MCU和芯片中执行数据包处理的遗留系统,可能不希望使用FIFO,对于这个场景,提供了一个直通模式,它绕过了现场验证,在TX直通模式中,TX调制数据应用于芯片的输入点,并“实时”处理,任何一个GPIO都可能被配置为TX数据输入函数.此外,如果需要GFSK调制,TX时钟输出功能可能需要一个额外的引脚(因此只需要TX数据输入引脚).为了实现直通模式,必须在“GPIO_PIN_CFG”API命令和“MODEM_MOD_TYPE”API属性中配置GPIO,对于GFSK,“TX_DIRECT_MODE_TYPE”必须设置为同步,对于FSK或OOK,该类型可以设置为异步或同步,MOD_SOURCE[1:0]应该设置为01h,在RX直通模式下,RX数据和RX时钟可以编程为直通输出到GPIO引脚.然后微控制器可以不使用FIFO的数据包处理程序功能来处理RX数据.

前导长度

前导长度要求只有在使用同步解调器时才相关,如果使用异步解调器,则不需要单独转换101010模式.前导检测阈值确定无线电接收的有效前导位的数量,序言中的阈值应根据应用程序的性质进行调整,所需的前导长度阈值取决于与传输包的开始和发送前导的长度相关的接收模式输入的时间,由于一个短于推荐的前导码检测阈值,错误检测的概率直接与接收机在接收到发射前导码之前对噪声工作的时间有关,对噪声的错误检测可能会导致遗漏实际的数据包.可以通过修改无线电控制面板中的“RX参数选项卡”中的“PM检测阈值”,来调整调制解调器计算器中的前导码检测阈值.对于大多数前导长度大于32位的应用程序,建议前导检测阈值为默认值20.如果可以容忍偶尔的错误检测,则可以选择一个较短的序言检测阈值.当启用天线分集时,建议使用20位前导检测阈值,表中显示了不同模式下推荐的前导检测阈值和前导检测长度.

推荐的序言长度

模式	AFC	天线选择	前导式	推荐的字节	推荐的阈值
(G)FSK	Disable	Disable	Standard	4字节	20位
(G)FSK	Enable	Disable	Standard	5字节	20位
(G)FSK	Disable	Disable	Non-standard	2字节	0位
(G)FSK	Enable		Non-standard	不支持	
(G)FSK	Disable	Enable	Standard	7字节	24位
(G)FSK	Enable	Enable	Standard	8字节	24位
4(G)FSK	Disable	Disable	Standard	40个符号	16个符号
4(G)FSK	Enable	Disable	Standard	48个符号	16个符号
4(G)FSK			Non-standard	不支持	
OOK	Disable	Disable	Standard	4字节	20位
OOK	Disable	Disable	Standard	2字节	0位
OOK	Enable			不支持	

内部功能区块

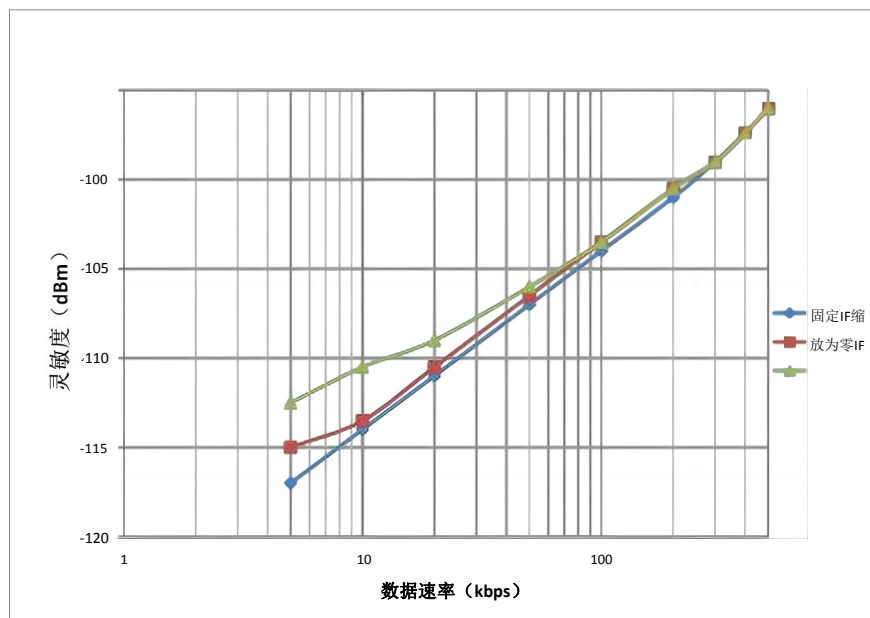
以下各部分概述了关键的内部区块和特性:

RX区链

芯片内部低噪声放大器(LNA)被设计成一个宽带LNA,以覆盖全SUB-GHZ频段的任何频率范围,LNA具有极低的噪声,可以抑制各段的噪声,并达到最佳的灵敏度.因此,不需要外部增益或前端模块.LNA具有增益控制,由内部自动增益控制(AGC)算法进行控制.LNA之后是一个混频器、滤波器、可编程增益放大器(PGA)和ADC.I-Q混频器将信号转换为中频,然后,PGA将增益提高到在ADC的动态范围内.ADC拒绝带外阻断器,并将信号转换到数字区域,在其进行滤波、解调和处理,峰值检测器集成在LNA和PGA的输出端,用于AGC算法.

RX区链架构

可以在不同的体系结构配置操作RX区链:固定中频、零中频、缩放中频和调制中频.在灵敏度、选择性和镜像抑制方面,架构之间存在平衡,固定中频是默认配置,并推荐为大多数应用程序.通过35dB的本机镜像抑制和自动镜像校准来实现55dB,固定中频解决方案为大多数应用程序提供了最好的性能.固定中频获得了最好的灵敏度,但它在图像频率上具有选择性降低的影响,QX40x设备中包含了自动镜像抑制校准,对于固定中频和零中频,当数据速率小于100kbps或带宽小于200kHz时,灵敏度就会降低.灵敏度的降低在接近直流时噪声的增加而引起的.零中频的好处是没有镜像频率.因此,选择性曲线没有退化,但它的灵敏度最差.缩放中频是固定中频和零中频之间的权衡.在缩放中频架构中,镜像频率被放置或隐藏在相邻信道中,轻微降低相邻信道选择性,缩放中频比零中频更好的灵敏度,但由于镜像的原因,选择性仍有所下降,在缩放中频模式下,图像频率与所选择的信道带宽成正比.



RX架构与数据速率

RX调制解调器

使用高性能ADC允许在数字域中执行通道滤波、镜像抑制和解调,允许针对特定应用优化设备,数字调制解调器执行以下功能:

- 通道选择滤波器
- TX调制
- RX解调
- 自动增益控制 (AGC)
- 前导程序检测
- 无效的序言检测
- 信号强度指示器 (RSSI)
- 自动频率控制 (AFC)
- 镜像抑制校准
- 数据包处理
- 循环核查CRC

数字信道滤波器和解调器被优化为超低功耗,并具有高度的可配置,支持的调制类型为GFSK,FSK,4GFSK,4FSK,GMSK,OOK. 信道滤波器可以配置为支持从850到1.1kHz的带宽,支持各种数据速率从100bps到1Mbps.采用可配置的前导码检测器和同步解调器,以提高同步字节检测的可靠性.使用同步检测就可以跳过前导检测,当在协议中使用非常短的前导时,如MBus,这是异步解调器的特性,接收到的信号强度指示器 (RSSI)在调谐通道上接收到的信号强度的测量值时.RSSI的分辨率为0.5dB,该高分辨率在RSSI可实现精确的信道功率测量,用于清晰信道评估(CCA)、载波感知(CS)和通话前收听(LBT)功能.

自动增益控制 (AGC)

AGC算法是通过为快速响应时间优化的高级控制回路实现的,AGC发生在单个比特或小于2 μ s内,LNA和PGA的输出峰值检测器允许对LNA增益和PGA增益进行最优调整,以优化选择性和灵敏度性能.

自动频率控制 (AFC)

通过启用接收模式下的数字自动频率控制 (AFC),可以补偿由晶体不准确引起的频率失谐,频率补偿有两种类型:调制解调器频率补偿和通过调节PLL频率来实现.禁用AFC后,调制解调器补偿可以纠正频率偏移高达 ± 0.25 的中频带宽,当AFC启用时,接收到的信号将位于中频滤波器的通带,在更宽的范围内提供最佳的频率偏移,达到 ± 0.35 ,当启用AFC时,序言长度需要足够长处理AFC.

镜像抑制和校准

由于接收机采用低中频体系结构,选择性将受到镜像频率的影响,中频频率为468.75kHz,镜像频率将比射频频率低937.5kHz,QX40x系列的镜像抑制比为35dB.QX40x可提供镜像抑制校准,将镜像抑制提高到55dB以上,使用IRCAL API命令启动校准,该校准使用了一个内部信号源,因此不需要任何外部信号发生器,初始校准需要250ms,定期重新校准需要100ms,当温度变化超过30°C时,应开始重新校准.

接收信号强度指示器 (RSSI)

接收的信号强度指示器 (RSSI)是对接收机被调谐到的信道中信号强度的值,RSSI的测量是在信道滤波器之后完成的,有两种不同的方法来读取RSSI值,读取RSSI的方法是配置四个快速响应寄存器中的一个,以返回一个锁定的RSSI值,锁存的RSSI值被每个包测量一次,并在输入RX模式后以可配置的时间量被锁存,快速响应寄存器可以在16个SPI时钟周期中读取,而不需要等待CTS,RSSI值也可以从GET_MODEM_STATUS命令中读出.在此命令中,当前RSSI和锁存RSSI都可用.当前RSSI值表示处理GET_MODEM_STATUS命令时的信号强度,可以对每个包读取多次,在GET_MODEM_STATUS命令中读取RSSI比从快速响应寄存器中读取RSSI所花费的时间更长,在初始命令之后,将需要33 μ s来设置CTS,然后需要4或5个字节的SPI时钟周期来读取各自的当前或锁存的RSSI值,RSSI配置选项将在MODEM_RSSI_CONTROL API属性中设置,锁存的RSSI值可以根据以下进行锁存和存储:前导检测、同步检测或在RX模式开始后测量的可配置的比特次数,次数的要求由处理延迟和通过调制解调器和数字信道滤波器的沉降来确定,在MODEM_RSSI_CONTROL中,RSSI可以被定义为更新每比特周期或每四比特周期进行平均和更新,如果启用了超过4比特的RSSI平均,那么在RX模式开始后,

锁定的RSSI值将被延迟到至少7比特,以允许平均.当进入RX模式时,锁定的RSSI值将被清除,因此可以在收到数据包后或降回待机模式后读取它们,如果RSSI值已被RX开始清除,但尚未锁定,如果试图读取该值,将返回值0.

在分组接收期间,检测是否有二次干扰信号,要检测此事件,可用于RSSI跳转检测的功能,如果在接收数据包期间,RSSI级别可改变一个可编程的量,则可以配置一个中断或GPIO来通知主机,RSSI的增加或减少(跳转)级别可通过MODEM_RSSI_JUMP_THRESH API属性进行编程,如果检测到RSSI跳转,调制解调器可以被编程为自动复位,以便它可以锁定新的更强的信号,芯片还可以配置为在跳转检测时自动重置接收器以获取新信号,RSSI跳转检测的配置和选项已在MODEM_RSSI_CONTROL2 API属性中进行编程,默认情况下,不启用RSSI跳变检测.

综合器

一个集成的综合器,能够在QX400/01/03的142-175、283-350、420-525和850-1050MHz的波段上工作,而QX404是在QX400/01/03未覆盖的频段内提供频率覆盖,使用综合器有许多优点,它提供选择数据率、偏差、信道频率和信道间距的灵活性,发射调制通过分频器直接应用于数字域内的回路,从而产生非常精确的精度和对发射偏差的控制,850-1050MHz频段的频率分辨率为28.6Hz,而其他频段的分辨率更高,PLL的参考频率为30MHz,但可以使用从25到32MHz的任何XTAL频率,WDS中的调制解调器配置计算器自动计算所使用的XTAL频率,PLL采用差分LC VCO,而VCO的输出端是一个可配置的分频器,它将把信号划分为所需的输出频带.

综合器的频率控制

通过将整数和分数设置更改为综合器的设置来设置频率,WDS计算器将完全提供这些信息,但综合器方程如下所示,设置频率 FREQ_CONTROL_INTE、FREQ_CONTROL_FRAC2 和 FREQ_CONTROL_FRAC1 和 FREQ_CONTROL_FRAC0的API.

$$RF_channel = \left(fc_inte + \frac{fc_frac}{2^{19}} \right) \times \frac{2 \times freq_xo}{outdiv} (Hz)$$

Outdiv	Lower (MHz)	Upper (MHz)
24	142	175
12	284	350
8	420	525
4	850	1050

Output Divider Values for QX400/01/03

Outdiv	Lower (MHz)	Upper (MHz)
24	119	159
16	177	239
12	235	319
8	353	479
4	705	960

Output Divider Values for QX404

EZ频率编程:

在使用多个频率或通道的应用程序中,可能不希望每次需要更改频率时写入四个API寄存器,以便需要一寄存器写就可以改变频率,提供EZ频率编程.首先通过对综合器来进行编程来设置基频,此基频将对通道为0,接下来,一个信道步长被编程到FREQ_CONTROL_CHANNEL_STEP_SIZE_1和FREQ_CONTROL_CHANNEL_STEP_SIZE_0 API寄存器中。

$$\text{RF Frequency} = \text{Base Frequency} + \text{Channel} \times \text{Stepsize}$$

START_RX 或 START_TX的第二个参数是通道,它为EZ频率编程设置通道号.例如,如果通道步长为1MHz,用INTE和FRAC API寄存器设置基频为900 MHz,在START_TX命令期间编程的通道号为5,产生的频率将为905MHz,如果没有将通道参数作为START_RX/TX命令写入,则它将默认为上一个值,通道的初始值是0.因此,如果没有通道值写入,它会产生可编程的基频.

自动RX跳转功能:

该收发器支持一个可以通过API完全配置的自动跳转功能,设备必须从一个通道跳到另一个通道并寻找数据包,一旦设备被放入RX状态,该功能被启用,它就会自动开始跳过HOP桌面.跳表可以容纳64次记录,跳点表最多可以容纳64个通道.表中的数量由RX_HOP_TABLE_SIZE API设置,指定的通道对应于程序频率的EZ频率编程,接收器从基本通道开始,并依次从跳转的顶部跳到底部,一旦到达桌面的末端,桌面就会绕到基本通道,表中的0xFF表示该跳过桌面,下面有三个条件可以用来决定是否继续跳跃或停留在一个特定的通道上,这些条件包括:

- RSSI阈值.
- 前导超时.
- 同步字超时.

这些条件可以单独使用,也可以通过同时配置RX_HOP_CONTROL API来一起启用.但是,根据所满足的第一个条件来决定是否跳转.被监视的RSSI是当前的RSSI值,并与阈值进行比较,如果高于阈值,它将保持在通道上.如果RSSI低于阈值,它将继续跳转,在从通道跳转过程中,没有进行RSSI的平均,由于前导超时和同步超时是需要数据包处理的特性,RSSI阈值是唯一可以使用的条件,用户在“直通”或“初始”模式,不使用数据包处理特性,则RSSI阈值是唯一可以使用的条件,请注意,该阈值不是一个绝对的RSSI值,相反,应该在工作台上进行验证,以找到应用程序的最佳阈值,使用此方法在不同通道上从RX到RX的周转时间为115μs.在接收模式中花费的时间将由HOP条件的配置决定.手动RX跳转将有快速周转时间,但主控MCU需要更多的框架和管理,以下是使用自动跳转的示例步骤:

- 1.设置基频和通道步长.
- 2.定义跳转表中的数字(RX_HOP_TABLE_SIZE).
- 3.通道写入跳转表(RX_HOP_TABLE_ENTRY_n).
- 4.配置跳转条件,并启用自动跳转-RSSI、前导码或同步(RX_HOP_CONTROL).
- 5.设置序言和同步参数设置已启用.
- 6.在调制的“MODEM_RSSI_THRESH”中编程RSSI阈值属性.
- 7.使用“PREAMBLE_CONFIG_STD_1”设置序言阈值.
- 8.使用“PREAMBLE_CONFIG_STD_2”编程前导超时属性.
- 9.设置同步检测参数.
- 10.使用“GPIO_PIN_CFG”来配置一个GPIO,以切换跳变和可跳变包装.
- 11.使用“START_RX”API,并将通道设置为跳点表中的有效目录.
- 12.设备处于自动跳转模式.

手动RX跳转功能

RX_HOP命令提供了从RX跳转到RX的最快方法,但需要由主机单片机上使用RX_HOP命令,跳转时间为75us,这种方法的时间比Start_RX或RX跳转更快,综合器校准所需的计算已被下载到主机上,并且由主机VCO_CNT0进行计算/存储.

发送器 (TX)

QX403/04包含一个集成的+20dBm发射器或功率放大器,能够从-20到+20dBm发射,在最大功率为6dB范围内,输出功率步长小于0.25dB,但在接近最小输出功率时变得更大,更非线性,QX403/04 PA在提供最高的效率和最低的电流消耗.QX401 PA能够从-40dBm到+16dBm,QX401 PA可以优化为最佳电流功耗,(E类)或输出功率步长和性能超过电压和温度,开关电流匹配在VDD以上,将具有良好的输出功率步长和更多的恒定的输出功率,但它将比E类匹配具有更高的电流功耗,E类将有最有效的电流功耗,但它将有更多的输出功率步长和VDD的变化.QX400在需要从单个电池操作的应用程序提供小于20mA的+10dBm输出功率,QX400也可以运行与E级或开关电流匹配,输出高达+13dBm Tx功率.芯片的TXRAMP引脚被默认禁用,以更在芯片上的PA能够驱动天线的情况下保存电流,将驱动外部PA,而外部PA需要一个斜坡信号,则TXRAMP使用的信号,若要启用TXRAMP,请设置API属性PA_MODE[7]=1,TXRAMP将开始上升,同时随着内部芯片上PA的上升/下降.爬坡速度由TC[3:0]在PA_RAMP_EX API属性中编程,具有以下特征:

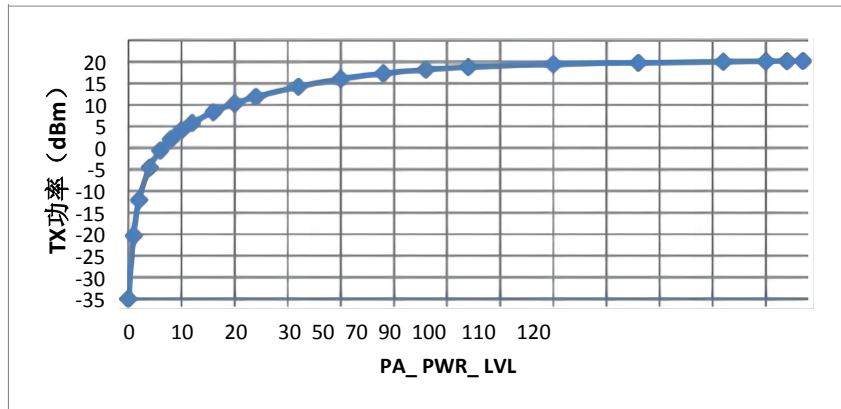
TC	Ramp Time (μs)
0.0	2.0
1.0	2.1
2.0	2.2
3.0	2.4
4.0	2.6
5.0	2.8
6.0	3.1
7.0	3.4
8.0	3.7
9.0	4.1
10.0	4.5
11.0	5.0
12.0	6.0
13.0	8.0
14.0	10.0
15.0	20.0

当接近V_{hi}和V_{lo}时,倾斜线接近线性倾斜线,TXRAMP引脚可以高达1mA电流而没有电压下降.TXRAMP引脚的向下相当于一个10k下拉电阻器,V_{hi}=3V时,V_{dd}>3.3V,当V_{dd}<3.3V时,V_{hi}将接近V_{dd},爬坡时间也将更小,V_{lo}=0V时,没有电流需要进入TXRAMP引脚,如果需要将10μA进入芯片中,V_{lo}将为10μA×10k=100mV.

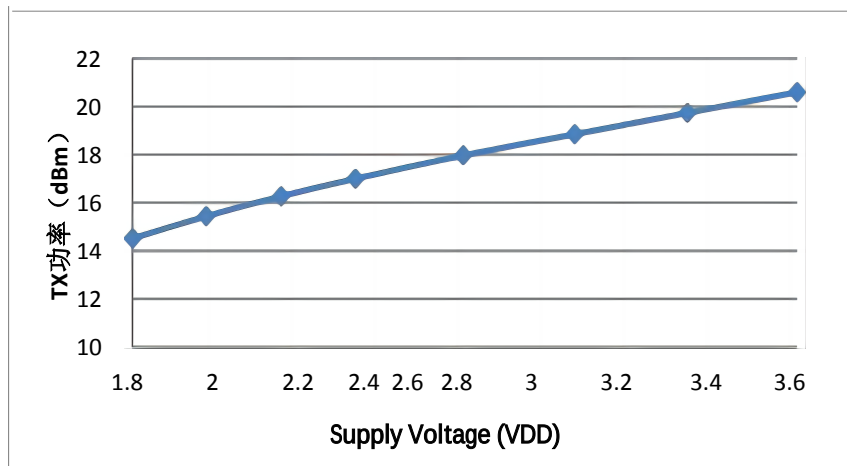
Number	Command	Summary
0x2200	PA_MODE	设置PA类型
0x2201	PA_PWR_LVL	调整TX功率
0x2202	PA_BIAS_CLKDUTY	调整粗步长的TX功率,优化不同匹配配置
0x2203	PA_TC	更改PA的上升时间

QX403/04 +20dBm PA

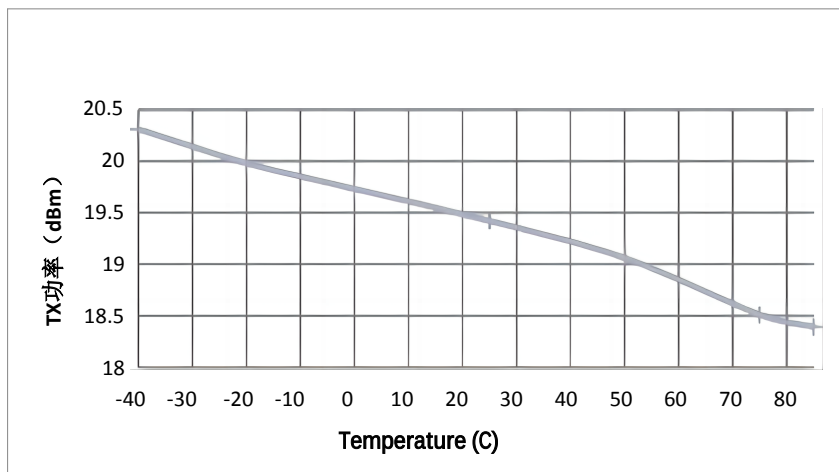
+20dBm配置采用了class-E匹配配置,对于输出功率步长、电压和温度的900MHz波段带宽的典型性能如图所示,输出功率通过PA_PWR_LVL API分128步进行改变。



+20 dBm TX Power vs. PA_PWR_LVL



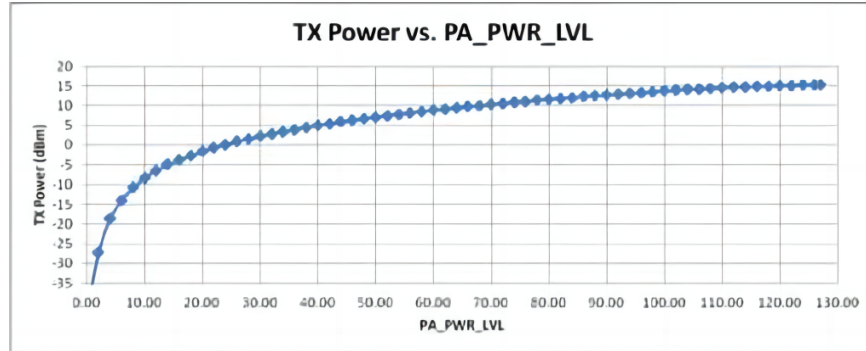
+20 dBm TX Power vs. VDD



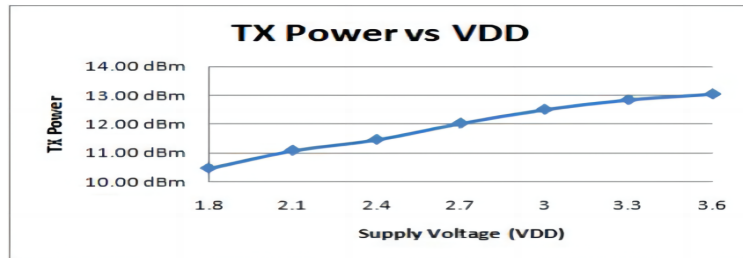
+20 dBm TX Power vs. Temp

QX401 +16dBm PA

QX401 PA可以利用不同的匹配项来优化16dBm、14dBm、13dBm或更低功率的性能,建议使用16dBm,以最大限度地提高效率 and 电池寿命.对于13dBm和14dBm,建议进行切换电流匹配,以提供超过VDD和温度变化的最佳性能,输出功率步级、电压和温度的900MHz波段的典型性能如图所示,输出功率通过PA_PWR_LVL API改变128步.



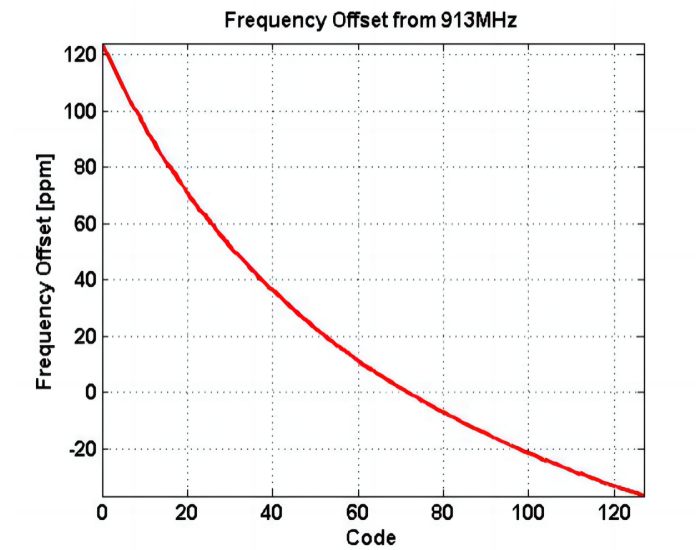
+13 dBm TX Power vs. PA_PWR_LVL



+13 dBm TX Power vs. Supply Voltage (VDD)

晶体振荡器

QX40x包括一个集成的晶体振荡器,其快速启动时间小于250uS,该设计与所需的晶体负载电容集成在芯片上,以最小化外部组件的数量,在默认情况下,芯片外所需要的晶体是30MHz,但电路设计为处理25MHz到32MHz的任何XTAL,如果使用不同于30MHz的晶体,则必须修改POWER_UP API引导命令.WDS计算器的晶体频率也必须改变,以反映所使用的频率.晶体负载电容可以通过数字编程,以适应具有各种负载电容要求的晶体,并调整晶体振荡器的频率,晶体负载电容的调整是通过GLOBAL_XO_TUNE API特性来编程的,总内部电容为11pF,可调节127步(70fF/步),晶体频率调整可用于补偿晶体产生公差,电容器组的频率偏移特性如图所示:



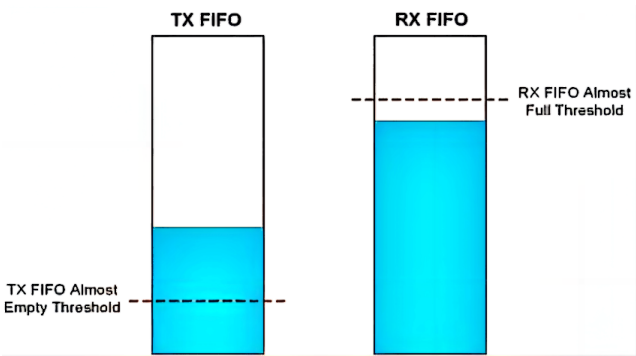
电容与频率偏移特性

利用芯片上的温度传感器和合适的控制软件,可以消除晶体的温度依赖性.一个TCXO或外部信号源可以很容易地用来代替传统的XTAL, 并且连接到XIN引脚.建议输入时钟信号具有600mV到1.4V范围内的峰峰摆动,并耦合到XIN 引脚.如果TCXO的峰值摆动超过1.4V的峰峰值,则应该使用与XIN针的直流耦合.XIN上允许的最大摆动峰值为1.8 V.当在XIN引脚上使用外部驱动器时,X0电容器组应设置为0,此外每当使用外部驱动器时,都应该使用TCXO选项来调用POWER_UP命令.

数据处理和数据包处理程序

RX and TX FIFO

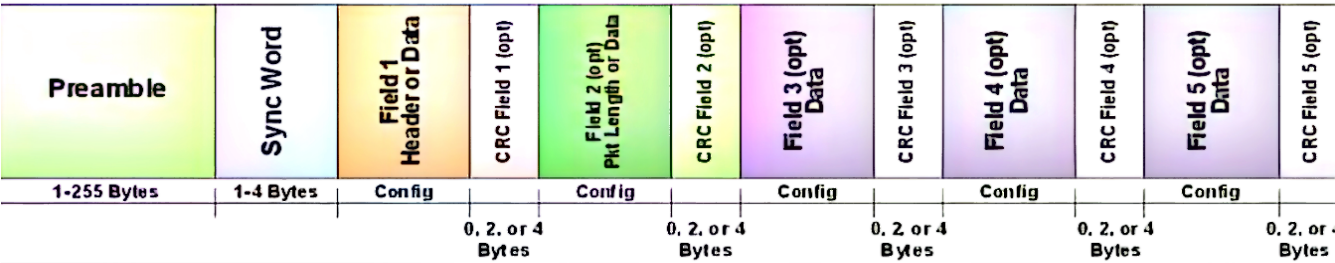
两个64字节的FIFO被集成到芯片中,一个用于RX,另一个用于TX,如图所示.写入命令寄存器66h将数据加载到TX FIFO中,并命令寄存器读取77h从RX FIFO读取数据.TX FIFO对于FIFO几乎为空的阈值,即由“TX_FIFO_EMPTY”属性来设置,当TX FIFO中的数据达到几乎为空的阈值时,就会发生中断事件.如果更多的数据没有加载到FIFO中,芯片会在PACKET_SE NT中断后自动退出TX状态,RX FIFO有一个可编程的阈值,它是通过设置“RX_FIFO_FULL”属性来编程的,当输入的RX数据跨越最满阈值时,将通过nIRQ端口向主控制器生成一个中断。然后,主控制器将要从RX FIFO中读取数据.RX Almost全阈值指示主机当时至少可以从RX FIFO中读取阈值字节数。TX和RX的FIFOs都可以通过“FIFO_RESET”命令进行清除或重置:



TX and RX FIFOs

数据包处理器

当使用FIFO时,可以为TX模式、RX模式或两者启用自动数据包处理,用于网络通信的常用字段,如前导、同步字、包头字、数据包长度和CRC,可以配置为自动添加到数据有效载荷中,生成数据包所需的字段通常很少发生变化,因此可以存储在存储器中,在TX模式下自动添加这些字段到数据负载,并在RX模式下自动检查它们,大大减少了微控制器与QX40x之间的通信量,它也大大降低了微控制器所需的计算能力,一般的数据包结构如图所示,内部数据包处理程序可以启用和检查任何或所有字段:



Packet Handler Structure

RX调制解调器配置

QX40x可以很容易地配置为不同的数据速率、偏差、频率等.通过使用WDS设置计算器,它生成一个初始化文件,供主机MCU使用.

辅助块

唤醒计时器和32 kHz时钟源

该芯片包含一个集成的唤醒定时器,可以用来定期地将芯片从睡眠模式中唤醒,唤醒定时器可从内部32 kHz RC振荡器运行,或从外部32kHz XTAL运行,唤醒计时器可以在睡眠模式时配置运行,如果WUT_EN=1在GLOBAL_WUT_CONFIG属性中,在进行入睡眠模式之前,唤醒计时器将计算由GLOBAL_WUT_R和GLOBAL_WUT_M属性定义指定的时间。在此周期结束时,如果在INT_CTL_CHIP_ENABLE属性中启用了此中断,则将在nIRQ引脚上生成一个中断.然后,微控制器将需要通过GET_INT_STATUS或快速响应寄存器读取芯片中断状态来验证中断,唤醒周期的计算公式如下:

$$WUT = WUT_M \times \frac{4 \times 2^{WUT_R}}{32,768} [\text{ms}]$$

RC振荡器频率会随温度变化,因此,需要定期重新校准,RC振荡器在POWER_UP命令期间自动校准,并从关闭状态退出,要启用重新校准特性,CAL_EN必须在GLOBAL_WUT_CONFIG属性设置,并且所需的校准周期应该在API属性中选择WUT_CAL_PERIOD[2: 0].在校准期间,将32 kHz RC振荡器的频率与30MHz的XTAL进行比较,然后进行相应的调整.校准需要启动30MHz XTAL,这增加了平均电流功耗.因此,较长的CAL_PERIOD会导致较低的平均电流消耗.32kHz XTAL精度由XTAL参数和内部电路组成.XTAL精度可以定义为XTAL初始误差+XTAL老化+ XTAL温度漂移+从内部振荡器电路失谐,由内部电路引起的误差通常小于10ppm.

WUT特定的命令和属性

API属性	描述	要求和说明
global_WUT_config	配置全球WUT	WUT_EN—启用/禁用唤醒计时器。 WUT_LBD_EN—启用/禁用电池间隔的低电池检测。 WUT_LDC_EN: 0=禁用Low duty cycle使用。 1= RX LDC使用, 被视为唤醒START_RX_WUT状态。 2 = TX LDC使用, 被视为唤醒START_TX_WUT状态。 CAL_EN—启用32 kHz RC的校准振荡器。 WUT_CAL_PERIOD[2: 0]—设置校准周期。
global_wut_m_15_8	设置HW WUT_M[15:8]	WUT_M-用于设置实际唤醒时间的参数。
global_wut_m_7_0	设置HW WUT_M[7:0]	WUT_M-用于设置实际唤醒时间的参数。
global_wut_r	设置WUT_R[4: 0] 设置WUT_SLEEP选择至WUT状态	WUT_R-用于设置实际唤醒时间的参数。 WUT_sleep : 0=在WUT后进入准备状态。 1=在WUT后进入睡眠状态。
global_wut_ldc	设置FW internal WUT_LDC	WUT_LDC-设置实际时间启动时间的参数。

WUT相关的API命令和属性

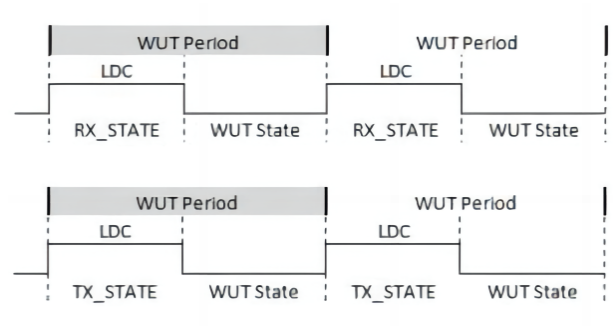
命令/属性	描述	要求和说明
WUT中断启用		
int_ctl_enable	中断启用属性	CHIP_INT_STATUS_EN-启用芯片状态中断。
int_ctl_chip_enable	芯片中断启用属性	WUT_EN-启用WUT中断。
32kHz时钟源选择		
global_clk_cfg	时钟配置选项	CLK_32K_SEL[2: 0]——配置WUT的源代码。
WUT中断输出		
gpio_pin_cfg	Host can enable interrupt on WUT expire	GPIOx_MODE[5:0] =14, NIRQ_MODE[5:0] =39.
RX/TX使用		
start_RX/TX	START RX/TX when wakeup timer expire	START=1

LDC模式(自动唤醒RX)

实现低占空比（LDC）模式,以自动唤醒接收机,以检查是否有有效的信号,或使发射机能够发送数据包,它允许使用唤醒定时器（WUT）的QX40x的低平均当前轮询操作,在设置WUT时，必须通过GLOBAL_WUT_CONFIG属性来设置RX和TX LDC操作,唤醒周期由以下公式确定：

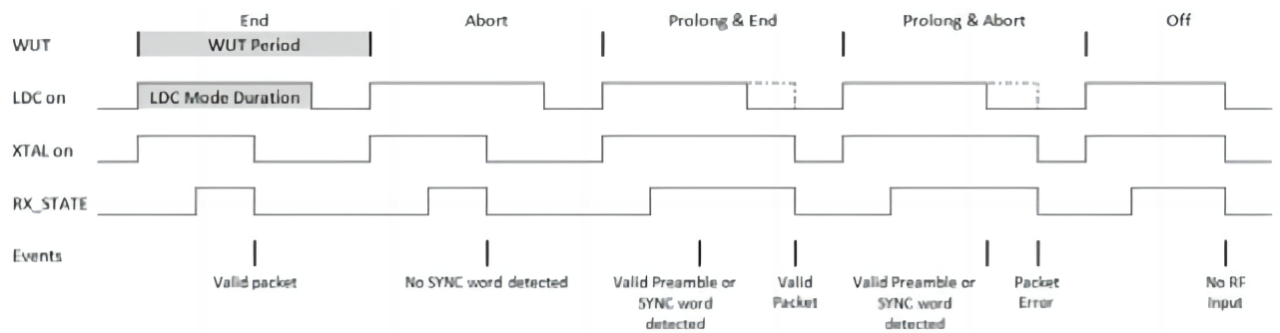
$$LDC = WUT_LDC \times \frac{4 \times 2^{WUT_R}}{32,768} [ms]$$

其中,WUT_LDC参数可以由GLOBAL_WUT_LDC属性来设置,WUT周期必须与LDC模式持续时间一起设置,有关相关的API属性,请参阅唤醒计时器（WUT）部分：



RX和TX LDC序列

RX LDC模式的基本操作如图所示,在LDC模式持续时间期间，接收器会定期唤醒自己以在RX_STATE上工作,如果没有检测到有效的前导，检测到接收错误或没有接收到整个包，接收方在LDC模式持续时间结束时返回WUT状态（即准备或休眠),并保持该模式，直到下一个唤醒周期开始,如果检测到有效的前导符或同步字,接收方将延迟LDC模式的持续时间，以接收整个数据包,如果在两个LDC模式持续时间期间没有接收到数据包，则接收方在最后一个LDC模式持续时间期间返回到WUT状态，直到下一个唤醒周期开始.



在RX模式的低占空比循环图

在TX LDC模式下,发射机周期性地唤醒自己,以传输位于数据缓冲区中的数据包,如果传输了数据包，若在INT_CTL_ENABLE属性中设置了选项，nIRQ会降低，发射后，发射机立即返回到WUT状态,并保持在那里,直到下一个唤醒时间结束.

温度, 电池电压和辅助ADC

QX40x系列包含一个用于测量内部电池电压, 内部温度传感器或GPIO上的外部组件, ADC利用了一个SAR架构, 并DP达到了11位分辨率, 有效位数(ENOB)为9位, 当测量外部组件时, 输入电压范围为1V, 转换率在300Hz到2.44kHz之间, ADC值是通过首先发送GET_ADC_READING命令并启用需要读取的输入: GPIO, 电池, 或温度. 在25°C时的温度传感器精度通常为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

■ Command :

GET_ADC_READING Command	7	6	5	4	3	2	1	0
CMD	0x14							
adc_en	0	0	0	temperature_en	battery_voltage_en	adc_gpio_en	adc_gpio_pin [1:0]	
adc_cfg				udtime3: 0	gpio_att [3:0]			

■ Reply :

GET_ADC_READING REPLY	7	6	5	4	3	2	1	0
CTS	CTS[7: 0]							
gpio_adc	gpio_adc [15:8]							
gpio_adc	gpio_adc [7:0]							
battery_adc	battery_adc [15:8]							
battery_adc	battery_adc [7:0]							
temp_adc	temp_adc [15:8]							
temp_adc	temp_adc [7:0]							
RESERVED	RESERVED							
RESERVED	RESERVED							

■ Parameters :

TEMPERATURE_EN :

0=ADC不执行温度转换, 读取值为0。

1=ADC执行温度转换, 读取值为TEMP_ADC ,

Temp ($^{\circ}\text{C}$) = TEMP_ADC[15: 0] x 568/2560-297。

BATTERY_VOLTAGE_EN :

0=ADC不转换电池电压, REPLY BATTERY_ADC读取值为0。

1=ADC转换电池电压, 结果为 $V_{\text{batt}} = 3 * \text{BATTERY_ADC} / 1280$ 。

ADC_GPIO_EN :

0=ADC不转换在GPIO, 读取值是0。

1=ADC转换在GPIO, 读取值为GPIO_ADC。V_{gpio}=GPIO_ADC/GPIO_ADC_DIV
.GPIO_ADC_DIV由GPIO_ATT选择定义。

ADC_GPIO_PIN[1:0] - 选择GPIOx 端口时, 引脚必须设置为输入 :

0=Measure voltageof GPIO0

1=Measure voltageof GPIO1

2=Measure voltageof GPIO2

3=Measure voltageof GPIO3

UDTIME[7:4] - ADC conversion Time = SYS_CLK / 12 / 2. 若 ADC_CFG is 0, 默认为 0xC。

选择较短的转换时间将导致较低的ADC分辨率，而较长的转换时间将导致较高的ADC分辨率。GPIO_ATT[3:0]-设置当VGPIO测量时，GPIO输入电压的ADC_CFG衰减值为0，则默认值为0xC：

```
0x4=ADC 0 to 0.8V, gpio_adc_div=2560
0x4=ADC 0 to 1.6V, gpio_adc_div= 1280
0x8=ADC 0 to 2.4V, gpio_adc_div=853.33
0x9=ADC 0 to 3.6V, gpio_adc_div= 426.66
0xC=ADC 0 to 3.2V, gpio_adc_div= 640
```

■ Response

```
GPIO_ADC[15:0] - ADC value of voltage on GPIO
BATTERY_ADC[15:0] -ADC value of battery voltage
TEMP_ADC[15:0] -ADC value of temperature sensor voltage
RESERVED[7:0] - RESERVED FOR FUTURE USE
RESERVED[7:0] - RESERVED FOR FUTURE USE
```

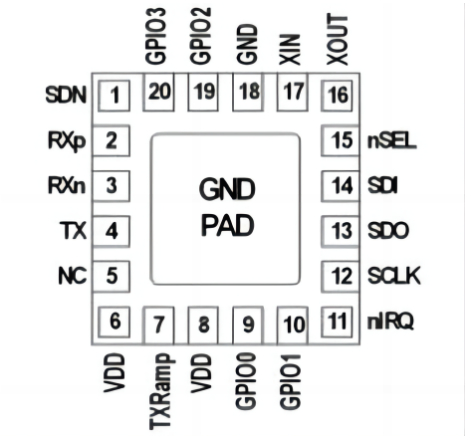
低电池检测器

启用低电池检测器（LBD），并作为唤醒定时器（WUT）的一部分使用，除非启用了WUT，否则LBD功能不可用，但主机MCU可以随时用辅助ADC手动检查电池电压，在GLOBAL_WUT_CONFIG API属性中启用了LBD函数，每次WUT到期满时，电池电压将与阈值进行比较，LBD函数的阈值是在GLOBAL_LOW_BATT_THRESH中设置的。阈值步长以50mV为增量，从至少1.5V到3.05V，LBD的精度为±3%。LBD可以配置为nIRQ引脚上的中断，也可以配置为GPIO之一的直接功能。

天线分集

为了缓解由多路径传播引起的频率选择性衰落问题，一些收发器系统使用了一种称为天线分集的方案，该方案采用了两个天线，每次收发器进入RX模式时，都将评估来自每个天线的接收信号强度，此评估过程将在数据包的前导部分期间进行。接收到最强信号的天线将用于该RX包的其余部分。同样的天线也将用于下一个相应的TX数据包，该芯片通过集成的天线分集控制算法完全支持天线分集，控制外部SPDT射频开关所需的信号可以在GPIO引脚上获得，这些GPIO信号的操作是可编程的，以允许不同的天线分集架构和配置，天线分集[2: 0]位可以在MODEM_ANT_DIV_CONTROL API属性描述中找到，并启用天线分集模式，GPIO引脚能够获得高达5mA的电流。

QX40x引脚和描述图：

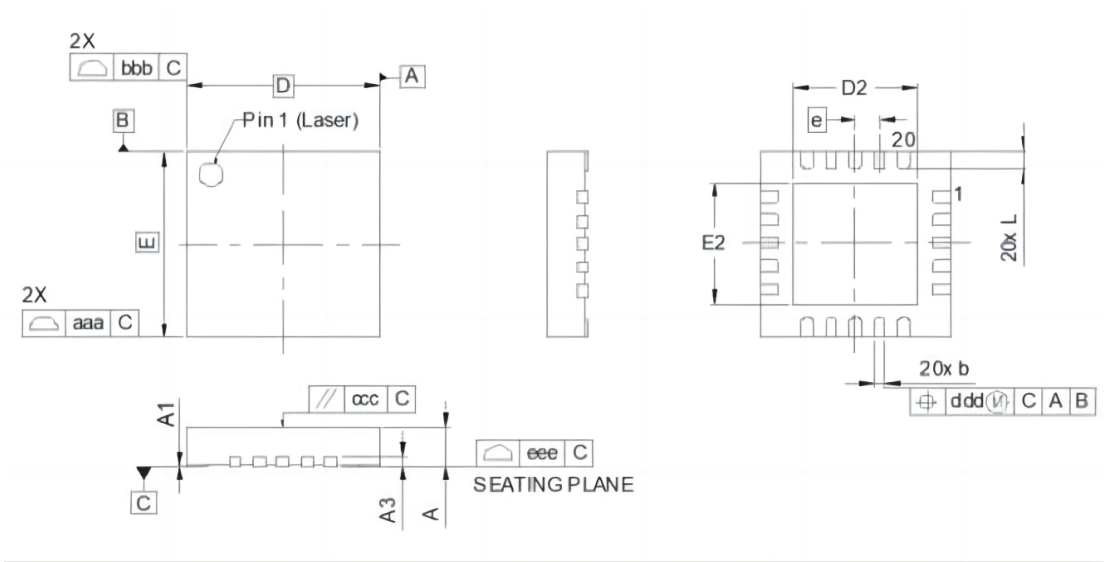


位号	名称	I/O	描述
1	SDN	I	关闭输入引脚:除关机模式外,所有模式下的SDN都应该是=0,当SDN =1时,芯片将完全关闭，寄存器将消失.
2	RXP	I	RF射频信号输入P
3	RXN	I	RF射频信号输入N
4	TX	O	发送信号输出引脚
5	NC		没有连接
6	VDD	S	VDD电源电压为+3.3V
7	TXRAMP	O	外部FET PA的可编程偏置输出
8	VDD	S	VDD电源电压为+3.3V
9	GPIO0	I/O	通用数字接口 I/O
10	GPIO1	I/O	通用数字接口 I/O
11	nIRQ	O	通用微控制器中断状态输出

位号	名称	I/O	描述
12	SCLK	I	SPI 串行时钟输入
13	SDO	O	SPI 串行数据输出
14	SDI	I	SPI 串行数据输入
15	nSEL	I	串行接口选择输入
16	XOUT	O	晶体振荡器输出
17	XIN	I	晶体振荡器输入
18	GND	GND	连接到PCB接地
19	GPIO2	I/O	通用数字接口 I/O
20	GPIO3	I/O	
PKG	paddle_gnd	GND	连接到PCB接地

QX40x封装信息:

QX40x封装和尺寸图



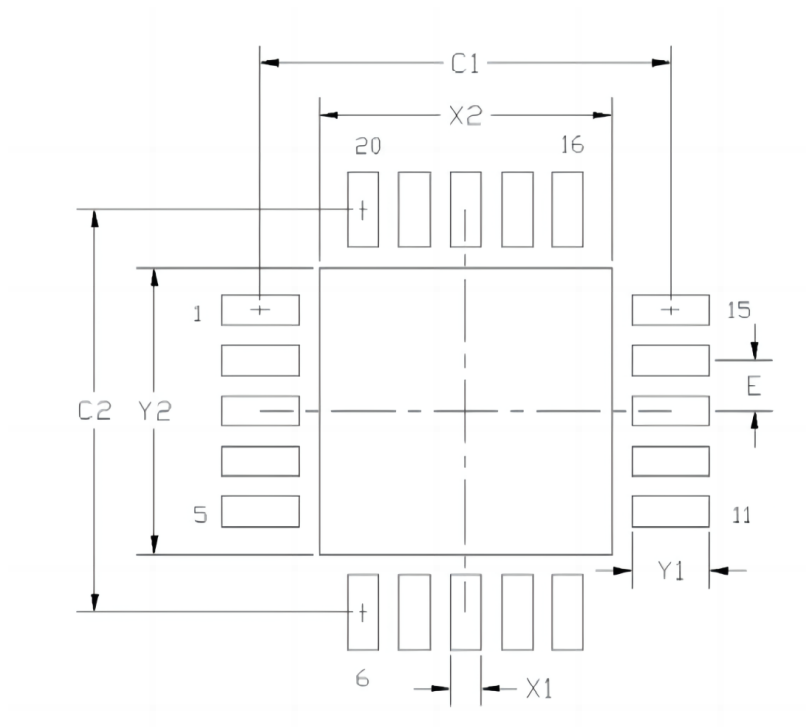
QFN20封装图

尺寸：毫米

符号	最小值	标准值	最高值
A	0.80	0.85	0.90
A1	0.00	0.02	0.05
A3	0.20 REF		
b	0.18	0.25	0.30
D	4.00 BSC		
D2	2.45	2.60	2.75
e	0.50 BSC		
E	4.00 BSC		
E2	2.45	2.60	2.75
L	0.30	0.40	0.50
aaa	0.15		
bbb	0.15		
ccc	0.10		
ddd	0.10		
eee	0.08		

QFN20封装尺寸

PCB平面外观和尺寸图:



PCB平面外观图

PCB平面尺寸

符号	尺寸(毫米mm)	
	最小	最大
C1	3.90	4.00
C2	3.90	4.00
E	0.50 REF	
X1	0.20	0.30
X2	2.55	2.65
Y1	0.65	0.75
Y2	2.55	2.65