

3D 低频唤醒无线接收器芯片

主要特性

- 3 通道 ASK 方式唤醒
- 载波频率范围 15-150 kHz
- 低功耗监听模式下最低功耗 2.1uA
- 唤醒灵敏度 80 μ Vrms
- 唤醒灵敏度可配置
- 16 位/32 位曼彻斯特编码可编程唤醒向量
- 支持两种唤醒方式：频率检测、唤醒向量
- 支持周期性人工唤醒 1s-2h
- 供电电压范围 2.4V-3.6V
- 工作温度范围 -40°C~85°C

应用范围

- 有源 RFID 标签
- 高价值资产跟踪
- 门禁管理系统
- 实时定位系统
- 无线传感器网络
- 操作员识别
- 访问控制
- 远程无钥匙进入

目 录

| | |
|-------------------------|-----------|
| 1 概述 | 4 |
| 1.1 主要特征 | 4 |
| 1.2 应用范围 | 4 |
| 2 结构框图 | 7 |
| 3 引脚信息 | 8 |
| 3.1 TSSOP-16 封装 | 8 |
| 3.2 QFN-16 封装 | 9 |
| 4 电气特性 | 11 |
| 4.1 极限参数 | 11 |
| 4.2 工作条件 | 12 |
| 4.3 DC/AC 参数 | 12 |
| 4.4 电气参数 | 13 |
| 5 工作模式 | 16 |
| 5.1 监听模式 | 16 |
| 5.2 人工唤醒 | 18 |
| 5.3 前导码检测/向量校验 | 18 |
| 5.4 数据接收 | 18 |
| 6 寄存器和 SPI | 20 |
| 6.1 寄存器 | 20 |
| 6.2 SPI | 23 |
| 6.2.1 SDI 命令结构 | 23 |
| 6.2.2 写入模式 | 25 |
| 6.2.3 读取模式 | 26 |
| 6.2.4 SDI 时序 | 27 |
| 7 通道放大器 | 28 |
| 7.1 频率检测 | 28 |
| 7.2 RSSI 计算 | 29 |

| | |
|----------------------------|-----------|
| 8 解调和数据分割 | 31 |
| 9 唤醒规则和曼彻斯特解码 | 35 |
| 9.1 唤醒规则..... | 35 |
| 9.2 校验器..... | 37 |
| 9.3 错误唤醒寄存器..... | 38 |
| 9.4 曼彻斯特解码和时钟恢复..... | 39 |
| 10 时钟产生电路 | 40 |
| 10.1 概述..... | 40 |
| 10.2 晶体振荡器..... | 40 |
| 10.3 RC 振荡器..... | 41 |
| 10.4 外部时钟源..... | 42 |
| 11 天线调谐 | 43 |
| 12 封装尺寸 | 45 |

1 概述

Si3933 是一款三通道的低功耗 ASK 接收机，可用于检测 15kHz-150kHz 低频载波频率的数字信号，并产生唤醒信号。内部集成的校验器用于检测 16 位或 32 位曼彻斯特编码的唤醒向量，且支持两次重复的向量校验。

Si3933 可以使用一个、两个或者三个通道工作，每个通道都具有频率检测功能和数字 RSSI 计算功能。通道的灵敏度可调，从而实现更长的通信距离，并且适应噪声环境下工作。

Si3933 具有内部时钟产生器，可选择使用晶体振荡器或者 RC 振荡器。用户也可以选择使用外部时钟。

Si3933 支持可编程的数据速率和带时钟恢复的曼彻斯特解码。自动调谐功能确保了芯片与所需载波频率的完美匹配，极大地简化了天线调谐。

1.1 主要特征

三通道 ASK 唤醒接收机

载波频率范围 15kHz -150kHz

低功耗监听模式下最低功耗 2.1uA

唤醒灵敏度 80uVrms

可编程的灵敏度调节

可编程的 16 位或 32 位曼彻斯特编码的唤醒向量

支持两种唤醒方式：频率检测、唤醒向量

错误唤醒寄存器

支持周期性的人工唤醒 1s-2h

供电电压范围 2.4V-3.6V

工作温度范围-40°C~85°C

1.2 应用范围

可应用于有源 RFID 标签、门禁管理系统、高价值资产跟踪、PKE 无钥匙进入系统、实时定位系统、操作员识别、访问控制和无线传感器网络。

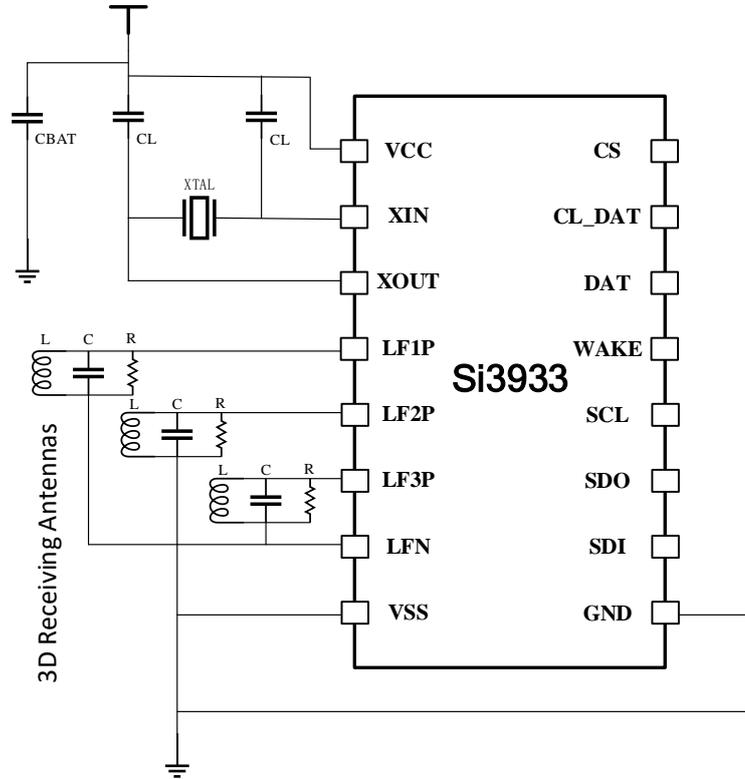


图 1-1 SI3933 采用晶振做时钟的应用图

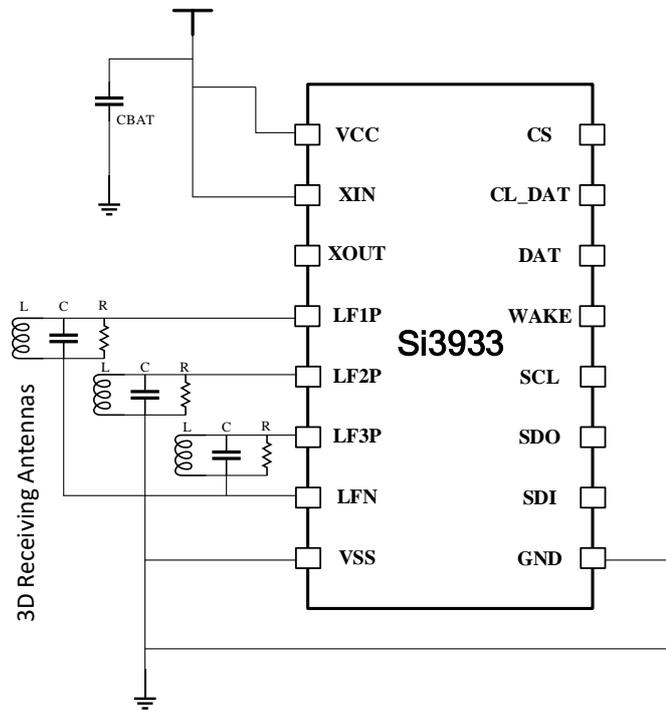


图 1-2 SI3933 采用 RC 振荡器做时钟的应用图

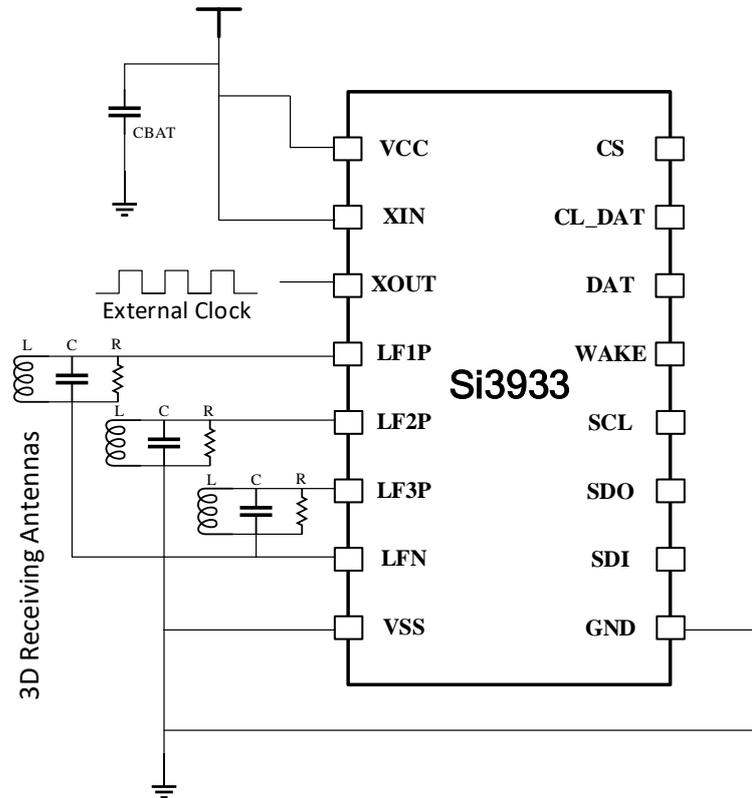


图 1-3 Si3933 采用外部时钟源的应用图

采用内部 RC 振荡器做时钟时，XIN 引脚需连接到 VCC，XOUT 引脚浮空。

采用外部时钟源时，XIN 引脚需连接到 VCC，XOUT 引脚接外部时钟源。

Si3933 所需的外部器件：

- (1) 电源稳压电容 CBAT。
- (2) 32.768kHz 晶体 XTAL 和两个上拉电容 CL（如使用内部 RC 振荡器取代晶体振荡器，则可省略）。
- (3) 1~3 个 LC 谐振网络，根据使用到的通道数目决定。

表 1-1 125kHz 载波时外部器件的典型应用值

| 外部器件 | 125kHz 载波时典型应用值 |
|------|-----------------|
| CBAT | 10uF |
| CL | 12pF |
| L | 7.2mH |
| C | 110pF |
| R | 240K |

3 引脚信息

3.1 TSSOP-16 封装

Si3933 采用 TSSOP-16 封装，引脚如图 3-1 所示，引脚描述见表 3-1。

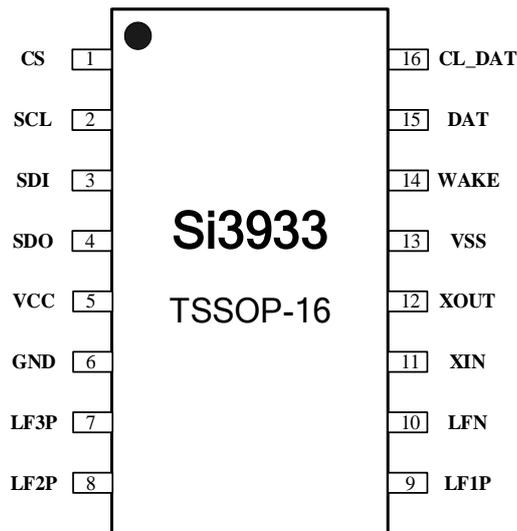


图 3-1 SI3933 TSSOP-16 引脚图

表 3-1 SI3933 TSSOP-16 引脚描述

| 引脚名 | 引脚编号 | 引脚类型 | 描述 |
|------|------|---------|-----------------------|
| CS | 1 | 数字输入 | 芯片选择 |
| SCL | 2 | 数字输入 | SDI 接口时钟 |
| SDI | 3 | 数字输入 | SDI 数据输入 |
| SDO | 4 | 数字输出/三态 | SDI 数据输出（当 CS 为低时，三态） |
| VCC | 5 | 电源 pad | 供电电压正极 |
| GND | 6 | 电源 pad | 供电电压负极 |
| LF3P | 7 | 模拟 I/O | 输入天线通道 3 |
| LF2P | 8 | 模拟 I/O | 输入天线通道 2 |
| LF1P | 9 | 模拟 I/O | 输入天线通道 1 |
| LFN | 10 | 模拟 I/O | 天线 1、2 和 3 的共同的地 |
| XIN | 11 | 模拟 I/O | 晶振输入 |

| | | | |
|--------|----|--------|-----------|
| XOUT | 12 | 模拟 I/O | 晶振输出 |
| VSS | 13 | 电源 pad | 衬底 |
| WAKE | 14 | 数字输出 | 唤醒输出 IRQ |
| DAT | 15 | 数字输出 | 数据输出 |
| CL_DAT | 16 | 数字输出 | 曼彻斯特恢复的时钟 |

3.2 QFN-16 封装

Si3933 采用 QFN-16 封装，引脚如图 3-2 所示，引脚描述见表 3-2。

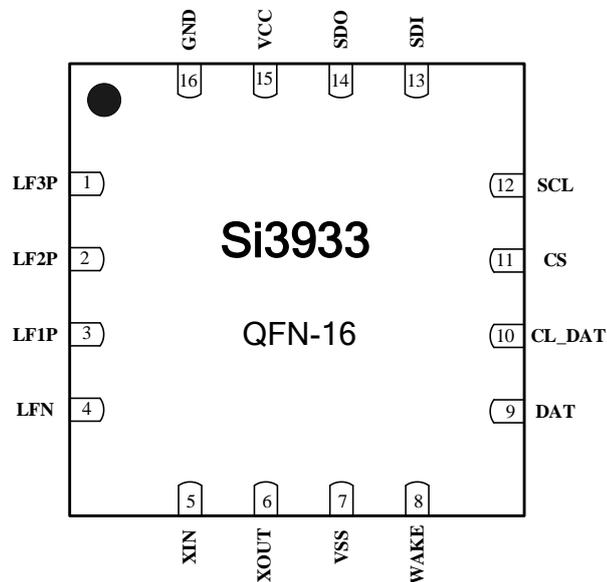


图 3-2 Si3933 QFN-16 引脚图

表 3-2 Si3933 QFN-16 引脚描述

| 引脚名 | 引脚编号 | 引脚类型 | 描述 |
|------|------|--------|------------------|
| LF3P | 1 | 模拟 I/O | 输入天线通道 3 |
| LF2P | 2 | 模拟 I/O | 输入天线通道 2 |
| LF1P | 3 | 模拟 I/O | 输入天线通道 1 |
| LFN | 4 | 模拟 I/O | 天线 1、2 和 3 的共同的地 |
| XIN | 5 | 模拟 I/O | 晶振输入 |
| XOUT | 6 | 模拟 I/O | 晶振输出 |
| VSS | 7 | 电源 pad | 衬底 |
| WAKE | 8 | 数字输出 | 唤醒输出 IRQ |

| | | | |
|--------|----|---------|-----------------------|
| DAT | 9 | 数字输出 | 数据输出 |
| CL_DAT | 10 | 数字输出 | 曼彻斯特恢复的时钟 |
| CS | 11 | 数字输入 | 芯片选择 |
| SCL | 12 | 数字输入 | SDI 接口时钟 |
| SDI | 13 | 数字输入 | SDI 数据输入 |
| SDO | 14 | 数字输出/三态 | SDI 数据输出（当 CS 为低时，三态） |
| VCC | 15 | 电源 pad | 供电电压正极 |
| GND | 16 | 电源 pad | 供电电压负极 |

4 电气特性

4.1 极限参数

超过表 4-1 中列出的一项或多项极限参数，可能造成器件的永久损伤。

表 4-1 Si3933 极限参数

| 符号 | 描述 | 最小 | 最大 | 单位 | 附注 |
|---------------------|--------------|------|------|----|-----|
| VCC | 直流供电电压 | -0.5 | 5 | V | |
| V _{IN} | 输入引脚电压 | -0.5 | 5 | V | |
| I _{SOURCE} | 输入电流（门锁免疫） | -100 | 100 | mA | |
| ESD | 静电放电 | ±2 | | kV | HBM |
| P _t | 总功耗（所有输入和输出） | | 0.07 | mW | |
| T _{strg} | 存储温度 | -65 | 150 | °C | |
| T _{body} | 封装体温度 | | 260 | °C | |
| RH _{NC} | 相对湿度（非冷凝） | 5 | 85 | % | |
| MSL | 湿气敏感等级 | 3 | | | |

4.2 工作条件

表 4-2 Si3933 工作条件

| 符号 | 描述 | 最小 | 典型 | 最大 | 单位 |
|------------------|--------|-----|----|-----|----|
| VCC | 供电电压正极 | 2.4 | 3 | 3.6 | V |
| VSS | 供电电压负极 | 0 | | 0 | V |
| T _{AMB} | 环境温度 | -40 | | 85 | °C |

4.3 DC/AC 参数

表 4-3 Si3933 DC/AC 参数

| 符号 | 描述 | 条件 | 最小 | 典型 | 最大 | 单位 |
|-------------------|---------|-------------|---------|--------|---------|----|
| CMOS 输入 | | | | | | |
| V _{IH} | 高电平输入电压 | | 0.6VCC | 0.7VCC | 0.8VCC | V |
| V _{IL} | 低电平输入电压 | | 0.12VCC | 0.2VCC | 0.3VCC | V |
| I _{LAEK} | 输入泄漏电流 | | | | 100 | nA |
| CMOS 输出 | | | | | | |
| V _{OH} | 高电平输出电压 | 1mA 负载 | VCC-0.4 | | | V |
| V _{OL} | 低电平输出电压 | 1mA 负载 | | | VSS+0.4 | V |
| C _L | 电容负载 | 1MHz 时钟 | | | 400 | pF |
| 三态 CMOS 输出 | | | | | | |
| V _{OH} | 高电平输出电压 | 1mA 负载 | VCC-0.4 | | | V |
| V _{OL} | 低电平输出电压 | 1mA 负载 | | | VSS+0.4 | V |
| I _{oz} | 三态泄漏电流 | 到 VCC 和 VSS | | | 100 | nA |

4.4 电气参数

表 4-4 Si3933 电气参数

| 符号 | 描述 | 条件 | 最 小 | 典型 | 最 大 | 单位 |
|-------------|----------------------------------|------------------------------------|--------|-----|--------|------------|
| 输入特性 | | | | | | |
| RIN | 125kHz 时交流输入阻抗 | 天线阻尼器不工 ($R1 < 4 \Rightarrow 0$) | | 5 | | k Ω |
| F1MAX | 频段 1 最大输入频率 | | | 150 | | kHz |
| F1MIN | 频段 1 最小输入频率 | | | 95 | | kHz |
| F2MAX | 频段 2 最大输入频率 | | | 95 | | kHz |
| F2MIN | 频段 2 最小输入频率 | | | 65 | | kHz |
| F3MAX | 频段 3 最大输入频率 | | | 65 | | kHz |
| F3MIN | 频段 3 最小输入频率 | | | 40 | | kHz |
| F4MAX | 频段 4 最大输入频率 | | | 40 | | kHz |
| F4MIN | 频段 4 最小输入频率 | | | 23 | | kHz |
| F5MAX | 频段 5 最大输入频率 | | | 23 | | kHz |
| F5MIN | 频段 5 最小输入频率 | | | 15 | | kHz |
| 电流消耗 | | | | | | |
| I1CHRC | 仅一个通道工作和 RC 振荡器作为时钟在标准监听模式下的电流消耗 | | | 3.2 | | μ A |
| I2CHRC | 两个通道工作和 RC 振荡器作为时钟在标准监听模式下的电流消耗 | | | 4.8 | | μ A |
| I3CHRC | 三个通道工作和 RC 振荡器作为时钟在标准监听模式下的电流消耗 | | | 6.4 | | μ A |
| I3CHSCRC | 三个通道工作和 RC 振荡器作为时钟在扫描模式下的电流消耗 | | | 3.2 | | μ A |
| I3CHOORC | 三个通道工作和 RC 振荡器作为时钟在开/关模式下的电流消耗 | 11% 占空比 | | 2.1 | | μ A |
| | | 50% 占空比 | | 4 | | |

| | | | | | | |
|---------------|----------------------------------|---|--|-----|--|-------|
| I3CHXT | 三个通道工作和晶振作为时钟在标准监听模式下的电流消耗 | | | 6.6 | | uA |
| IDATA | 前导码检测/向量校验/数据接收模式下的电流消耗 (RC 振荡器) | 125kHz 载波频率和 1kbps 数据速率, 输出引脚无负载 | | 8.6 | | uA |
| IBOOST | 增益提高使能后每个通道增加的电流消耗 | | | 80 | | nA |
| 输入灵敏度 | | | | | | |
| SENS1 | 频段 1 下所有通道的灵敏度 | 125kHz 载波频率, 默认模式, 4 个半位的触发+4 个符号的前导码和单向量检测 | | 100 | | uVrms |
| SENS1B | 开启两个增益提高时频段 1 下所有通道的灵敏度 | 125kHz 载波频率, 默认模式, 4 个半位的触发+4 个符号的前导码和单向量检测 | | 80 | | uVrms |
| SENS2 | 频段 2 下所有通道的灵敏度 | 90kHz 载波频率, 默认模式, 4 个半位的触发+4 个符号的前导码和单向量检测 | | 100 | | uVrms |
| SENS2B | 开启两个增益提高时频段 2 下所有通道的灵敏度 | 90kHz 载波频率, 默认模式, 4 个半位的触发+4 个符号的前导码和单向量检测 | | 80 | | uVrms |
| SENS3 | 频段 3 下所有通道的灵敏度 | 60kHz 载波频率, 默认模式, 4 个半位的触发+4 个符号的前导码和单向量检测 | | 100 | | uVrms |
| SENS3B | 开启两个增益提高时频段 3 下所有通道的灵敏度 | 60kHz 载波频率, 默认模式, 4 个半位的触发+4 个符号的前导码和单向量检测 | | 80 | | uVrms |
| SENS4B | 开启两个增益提高时频段 4 下所有通道的灵敏度 | 30kHz 载波频率, 默认模式, 4 个半位的触发+4 个符号的前导码和单向量检测 | | 80 | | uVrms |
| SENS5B | 开启两个增益提高时频段 5 下所有通道的灵敏度 | 18kHz 载波频率, 默认模式, 4 个半位的触发+4 个符号的前导码和单向量检测 | | 80 | | uVrms |
| 通道建立时间 | | | | | | |

| | | | | | | |
|---------------|---------|------------------------|----|--------|------|-----------|
| TSAMP | 放大器建立时间 | | | 250 | | us |
| 晶振 | | | | | | |
| FXTAL | 频率 | 与石英有关 | 25 | 32.768 | 45 | kHz |
| TXTAL | 启动时间 | | | 1 | | s |
| IXTAL | 电流消耗 | | | 560 | | nA |
| 外部时钟源 | | | | | | |
| IEXTCL | 电流消耗 | | | 0.8 | | uA |
| FEXTCL | 频率 | | 25 | | 45 | kHz |
| RC 振荡器 | | | | | | |
| FRCNCAL | 频率 | 未校准 | 25 | 32.768 | 45 | kHz |
| FRCCAL32 | | 使用 32.768kHz 参考时钟进行校准 | 31 | 32.768 | 34.5 | |
| FRCCALMAX | | 校准后最大能达到的频率 | | 45 | | |
| FRCCALMIN | | 校准后最小能达到的频率 | | 23.75 | | |
| TRC | 启动时间 | RC 使能后 (R1<0>=0) | | | 1 | s |
| TCALRC | 校准时间 | | 65 | | | 参考时钟周期的个数 |
| IRC | 电流消耗 | | | 730 | | nA |
| LC 振荡器 | | | | | | |
| FLCOMIN | 最小频率 | L=47mH, C=2.3nF | | 15 | | kHz |
| FLCOMAX | 最大频率 | L=7.2mH, C=150pF | | 150 | | kHz |
| RPARMIN | 最小等效电阻 | | | 10 | | kΩ |
| 调谐电容 | | | | | | |
| LF1Ptuning | 电容 | LF1P 的最大内部电容 (步长 1 pF) | | 31 | | pF |
| LF2Ptuning | | LF2P 的最大内部电容 (步长 1 pF) | | 31 | | pF |
| LF3Ptuning | | LF3P 的最大内部电容 (步长 1 pF) | | 31 | | pF |

5 工作模式

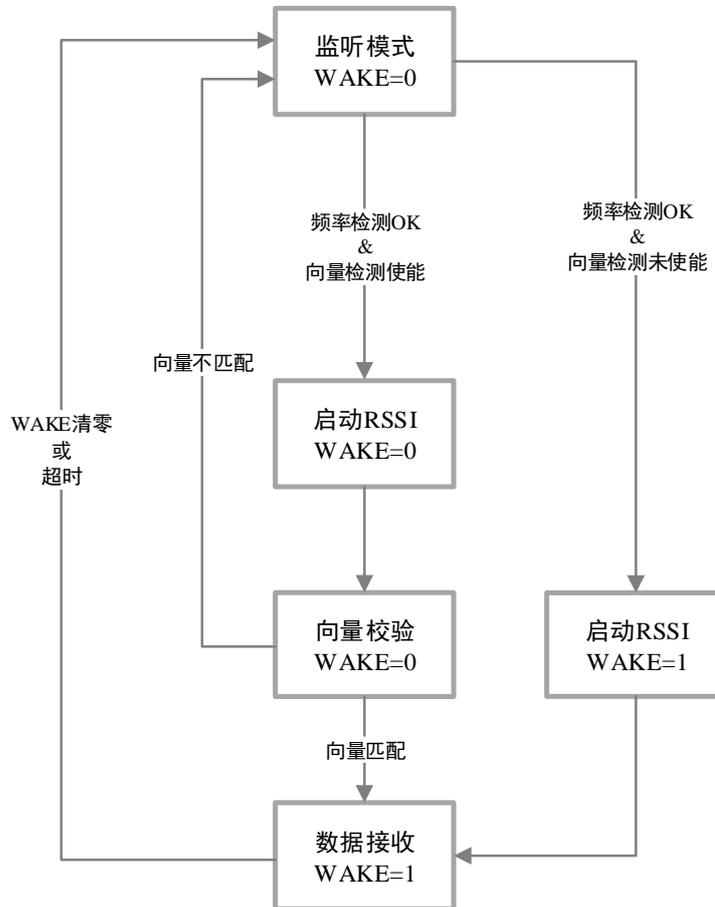


图 5-1 Si3933 工作模式流程图

5.1 监听模式

监听模式下，所有活跃的通道接收载波信号。如果检测到特定频率的载波，三个通道开始计算数字 RSSI 值，并存储在相应的寄存器中。

如果不需要三个通道工作，可以关闭一个或两个通道。如果需要两个通道工作则关闭通道二，如果仅一个通道工作则是通道一。

监听模式可以细分为以下三种工作模式。

(1) 标准监听模式

所有活跃的通道同时工作。

(2) 扫描模式（低功耗模式 1）

定义 1ms 的时间窗口，在每个时间窗口内仅有一个通道活跃。如图 5-2 所示，当某个时间窗口结束，当前活跃的通道变为关闭，下一个通道变成活跃，以此类推。例如，三个通道都使能，在第一个时间窗口内仅通道一活跃。当第一个时间窗口结束，通道一关闭，通道三变得活跃。在第二个时间窗口内仅通道三活跃。当第二个时间窗口结束，通道三关闭，通道二变得活跃。在第三个时间窗口内，通道二活跃，其他两个通道关闭。下一个时间窗口又轮到通道一活跃，按上述顺序循环工作，直到任何一个通道检测到载波。扫描模式（通道循环）由 Si3933 内部逻辑控制，不需要外部的 MCU。只要一个通道检测到载波，三个通道立即变得同时活跃。Si3933 会比较出哪个通道 RSSI 最强。最高 RSSI 的通道将连接至解调器。这样，只用单个通道的电流消耗来执行三个通道的监听，灵敏度与三个通道同时工作一样。

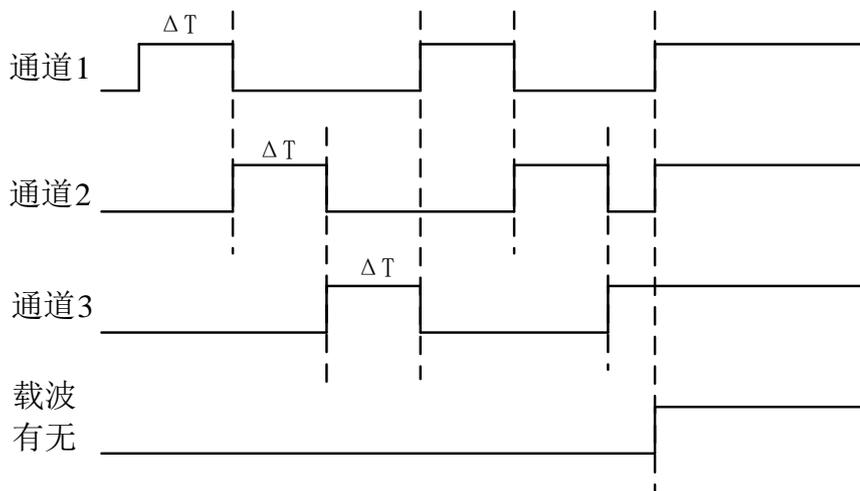


图 5-2 扫描模式

(3) 开/关模式（低功耗模式 2）

接收通道进入间歇模式，如图 5-3 所示，在某个时间窗口 T (T=1ms) 内，所有活跃的通道同时打开，下一个时间段内，又同时关闭。关闭时间由寄存器 R4<7:6>控制。例如，R4<7:6>=11，关闭时间是 8ms，开启时间是 1ms。

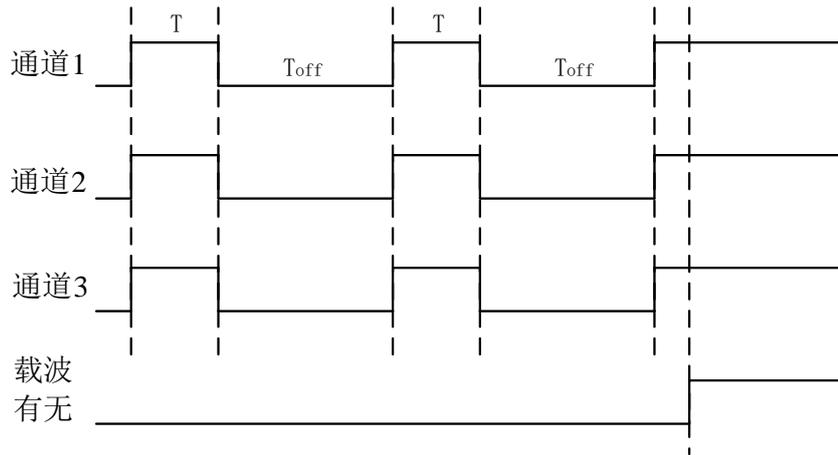


图 5-3 开/关模式

5.2 人工唤醒

监听模式下可以开启人工唤醒，一个基于时钟产生电路的计数器。寄存器 R8<2:0> 定义时间窗口。在这个时间窗口内无动作，引脚 WAKE 上产生一个持续 128us 的中断。通过该中断，微控制器可以访问错误唤醒寄存器 R13<7:0>来判断周围环境，并做出应对。

5.3 前导码检测/向量校验

检测到低频载波后，只要向量校验使能 (R1<1>=1)，芯片将进入该模式。校验器先接收前导码，再是向量。如果向量校验没使能 (R1<1>=0)，芯片直接进入数据接收模式。

该模式下，如果接收的向量匹配成功，WAKE 引脚出现唤醒中断（拉高），芯片将进入数据接收模式。如果匹配失败，终止内部唤醒（所有活跃通道上的），没有中断产生。

默认模式下，数据屏蔽关闭 (R0<6>=0)，DAT 引脚显示解调后的整个信号（载波触发+前导码+向量+数据）。如果数据屏蔽开启 (R0<6>=1)，在唤醒中断产生后，DAT 引脚显示解调后的数据。

5.4 数据接收

成功唤醒后，芯片将进入数据接收模式。该模式下，芯片可以保留一个 OOK 接收机。数据显示在 DAT 引脚上，如果曼彻斯特解码使能 (R1<3>=1)，恢复的时钟显示在

CL_DAT 引脚上。通过直接命令 CLEAR_WAKE 或者超时功能, 芯片可以回到监听模式。
寄存器 R7<7:5> 定义一个时间, 超过该时间, 芯片回到监听模式。

6 寄存器和 SPI

6.1 寄存器

表 6-1 寄存器概述

| | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
|-----|---------------|------------|-------------|------------|--------------|------------|---------|---------|
| R0 | PATT32 | DAT_MASK | ON_OFF | MUX_123 | EN_A2 | EN_A3 | EN_A1 | EN_IV |
| R1 | ABS_HY | AGC_TLIM | AGC_UD | ATT_ON | EN_MAN CH | EN_PAT2 | EN_WPAT | EN_XTAL |
| R2 | S_ABS | EN_EXT_CLK | G_BOOST | VB3_D | DISPLAY_CLK | | S_WU1 | |
| R3 | HY_20m | HY_POS | FS_SLC | | | FS_ENV | | |
| R4 | T_OFF | | D_RES | | GR | | | |
| R5 | PATT2B | | | | | | | |
| R6 | PATT1B | | | | | | | |
| R7 | T_OUT | | | T_HBIT | | | | |
| R8 | BAND_SEL | | | | | T_AUTO | | |
| R9 | BLOCK_AGC | | | | | | | |
| R10 | | | | RSSI1 | | | | |
| R11 | | | | RSSI2 | | | | |
| R12 | | | | RSSI3 | | | | |
| R13 | F_WAKE | | | | | | | |
| R14 | RC_CAL_OK | RC_CAL_KO | RC_OSC_TAPS | | | | | |
| R15 | | | | LC_CAL_OK | LC_CAL_KO | | | |
| R16 | CLOCK_GEN_DIS | | RC_OSC_MIN | RC_OSC_MAX | | LC_OSC_MUX | | |
| R17 | | | | CAP_CH1 | | | | |
| R18 | | | | CAP_CH2 | | | | |

| | | | | | | | |
|-----|--|--|--|---------|------------------|--------|--|
| R19 | | | | CAP_CH3 | | | |
| R20 | | | | | | | |
| R21 | | | | GBOOST | START_ I_XTAL | I_XTAL | |
| R22 | | | | | RC_OSC_TAPS_EXTD | | |

表 6-2 寄存器描述

| 寄存器 | 名字 | 类型 | 默认值 | 描述 |
|---------|-------------|-----|-----|---------------------------------------|
| R0<7> | PATT32 | R/W | 0 | 向量扩展到 32 位（0 为 16 位，1 为 32 位） |
| R0<6> | DAT_MASK | R/W | 0 | 唤醒前屏蔽 DAT 引脚上的数据（0 不屏蔽，1 屏蔽） |
| R0<5> | ON_OFF | R/W | 0 | 开/关模式使能 |
| R0<4> | MUX_123 | R/W | 0 | 扫描模式使能 |
| R0<3> | EN_A2 | R/W | 1 | 通道 2 使能 |
| R0<2> | EN_A3 | R/W | 1 | 通道 3 使能 |
| R0<1> | EN_A1 | R/W | 1 | 通道 1 使能 |
| R0<0> | EN_IV | R/W | 0 | 电流/电压偏置使能，0 有效 |
| R1<7> | ABS_HY | R/W | 0 | 数据分割比较器的绝对阈值使能 |
| R1<6> | AGC_TLIM | R/W | 0 | AGC 仅在第一次载波触发时工作 |
| R1<5> | AGC_UD | R/W | 1 | 为 1，AGC 可以增减增益；为 0，AGC 仅减小增益 |
| R1<4> | ATT_ON | R/W | 0 | 天线阻尼器使能 |
| R1<3> | EN_MANCH | R/W | 0 | 曼彻斯特解码使能 |
| R1<2> | EN_PAT2 | R/W | 0 | 双唤醒向量校验 |
| R1<1> | EN_WPAT | R/W | 1 | 校验器使能 |
| R1<0> | EN_XTAL | R/W | 1 | 晶振使能 |
| R2<7> | S_ABS | R/W | 0 | 数据分割比较器的绝对阈值降低 |
| R2<6> | EN_EXT_CLK | R/W | 0 | 外部时钟使能 |
| R2<5> | G_BOOST | R/W | 0 | 放大器增益提高 |
| R2<4> | VB3_D | R/W | 0 | 偏置电压 vb3 减小 |
| R2<3:2> | DISPLAY_CLK | R/W | 00 | 11 时将时钟产生器的频率送到引脚 CL_DAT，同时需 R16<7>=1 |

| | | | | |
|----------|---------------|-----|----------|--|
| R2<1:0> | S_WU1 | R/W | 00 | 频率检测时容错能力设置 |
| R3<7> | HY_20m | R/W | 0 | 数据分割比较器的迟滞电压（0 为 40mV，1 为 20mV） |
| R3<6> | HY_POS | R/W | 0 | 数据分割比较器的迟滞发生在正跳沿（0 正跳沿和负跳沿，1 仅正跳沿） |
| R3<5:3> | FS_SLC | R/W | 100 | 数据分割比较器的时间常数 |
| R3<2:0> | FS_ENV | R/W | 000 | 解调器的时间常数 |
| R4<7:6> | T_OFF | R/W | 00 | 开/关模式下的关断时间（00 为 1ms，01 为 2ms，10 为 4ms，11 为 8ms） |
| R4<5:4> | D_RES | R/W | 01 | 天线阻尼器电阻 |
| R4<3:0> | GR | R/W | 0000 | 增益衰减 |
| R5<7:0> | PATT2B | R/W | 01101001 | 唤醒向量的第二个字节 |
| R6<7:0> | PATT1B | R/W | 10010110 | 唤醒向量的第一个字节 |
| R7<7:5> | T_OUT | R/W | 000 | 自动超时时间设置 |
| R7<4:0> | T_HBIT | R/W | 01011 | 位持续时间定义 |
| R8<7:5> | BAND_SEL | R/W | 000 | 频段选择 |
| R8<2:0> | T_AUTO | R/W | 000 | 人工唤醒（000，不进行人工唤醒；001，1s；010，5s；011，20s；100，2min；101，15min；110，1h；111，2h） |
| R9<7> | BLOCK_AGC | R/W | 0 | 禁用 AGC |
| R10<4:0> | RSSI1 | R | | 通道 1 的 RSSI 值 |
| R11<4:0> | RSSI2 | R | | 通道 2 的 RSSI 值 |
| R12<4:0> | RSSI3 | R | | 通道 3 的 RSSI 值 |
| R13<7:0> | F_WAKE | R | | 错误唤醒寄存器 |
| R14<7> | RC_CAL_OK | R | | RC 振荡器校准成功 |
| R14<6> | RC_CAL_KO | R | | RC 振荡器校准失败 |
| R14<5:0> | RC_OSC_TAPS | R | | RC 振荡器校准设置 |
| R15<4> | LC_CAL_OK | R | | LC 振荡器工作 |
| R15<3> | LC_CAL_KO | R | | LC 振荡器不工作 |
| R16<7> | CLOCK_GEN_DIS | R/W | 0 | 将时钟产生器的输出信号显示在引脚 CL_DAT 上，同时需 R2<3:2>=11 |
| R16<5> | RC_OSC_MIN | R/W | 0 | RC 振荡器设置为最小频率 |

| | | | | |
|----------|------------------|-----|-------|---------------------------|
| R16<4> | RC_OSC_MAX | R/W | 0 | RC 振荡器设置为最大频率 |
| R16<2> | LC_OSC_MUX3 | R/W | 0 | 将 LF3P 的谐振频率显示在引脚 DAT 上 |
| R16<1> | LC_OSC_MUX2 | R/W | 0 | 将 LF2P 的谐振频率显示在引脚 DAT 上 |
| R16<0> | LC_OSC_MUX1 | R/W | 0 | 将 LF1P 的谐振频率显示在引脚 DAT 上 |
| R17<4:0> | CAP_CH1 | R/W | 00000 | 通道 1 的调谐电容值设置 |
| R18<4:0> | CAP_CH2 | R/W | 00000 | 通道 2 的调谐电容值设置 |
| R19<4:0> | CAP_CH3 | R/W | 00000 | 通道 3 的调谐电容值设置 |
| R21<4> | GBOOST | R/W | 0 | 为 1 时放大器增益提升 (R2<5>必须为 1) |
| R21<3> | START_I_XTAL | R/W | 0 | 设置晶体振荡器起振电流 |
| R21<2:0> | I_XTAL | R/W | 000 | 设置晶体振荡器电流损耗 |
| R22<3:0> | RC_OSC_TAPS_EXTD | R | 0000 | 扩展的 RC 振荡器校准控制位 |

6.2 SPI

微控制器通过四线 SPI 对 Si3933 编程。最大工作频率是 6MHz。

表 6-3 SPI 引脚描述

| 名称 | 类型 | 描述 |
|------|------|---------------------------------------|
| CS | 数字输入 | 片选 |
| SDI | 数字输入 | 串行数据输入 (写入寄存器的数据, 传输的数据和/或可读寄存器的写入地址) |
| SDO | 数字输出 | 串行数据输出 (接收到的数据或选定寄存器的读取值) |
| SCLK | 数字输入 | 串行数据的读写时钟 |

如果 CS 为 0, 则 SDO 为三态, 此时多个设备可以在同一 SDO 总线上进行通信。

6.2.1 SDI 命令结构

要对 SPI 编程, 需将 CS 置为高电平。SDI 命令由两个字节串行命令组成, 数据在 SCLK 的下降沿被采样。表 6-4 所示的是从 MSB(B15)到 LSB(B0)的 SDI 命令结构。数

据流必须从 MSB(B15)到 LSB(B0)发送到 SPI。

表 6-4 SDI 命令结构

| 模式 | | 寄存器地址/直接命令 | | | | | | 寄存器数据 | | | | | | | |
|-----|-----|------------|-----|-----|-----|----|----|-------|----|----|----|----|----|----|----|
| B15 | B14 | B13 | B12 | B11 | B10 | B9 | B8 | B7 | B6 | B5 | B4 | B3 | B2 | B1 | B0 |

前两位(B15 和 B14)定义操作模式。有三种可用模式(写入、读取、直接命令)，如表 6-5 所示。

表 6-5 SDI 命令结构中的模式

| B15 | B14 | 模式 |
|-----|-----|------|
| 0 | 0 | 写入 |
| 0 | 1 | 读取 |
| 1 | 0 | 禁用 |
| 1 | 1 | 直接命令 |

写入和读取模式下，接下来的六位(B13 到 B8)定义为寄存器的读写地址，如表 6-6 所示。

表 6-6 SDI 命令结构中的寄存器地址

| B13 | B12 | B11 | B10 | B9 | B8 | 对应的寄存器 |
|-----|-----|-----|-----|----|----|--------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | R0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | R1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | R2 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | R3 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | R4 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | R5 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | R6 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | R7 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | R8 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | R9 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | R10 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | R11 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | R12 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | R13 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | R14 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|-----|
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | R15 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | R16 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | R17 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | R18 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | R19 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | R20 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | R21 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | R22 |

最后八位是读写的数据。CS 状态 1-0-1 转换可以终止读写模式。

直接命令（B15=1、B14=1）模式下，B13 到 B8 定义为直接命令，最后八位省略。表 6-7 所示的是所有可能的直接命令。

表 6-7 SDI 命令结构中的直接命令

| B13 | B12 | B11 | B10 | B9 | B8 | 直接命令 | 描述 |
|-----|-----|-----|-----|----|----|----------------|------------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | clear_wake | 清除芯片的唤醒状态。如芯片已唤醒(WAKE 引脚为高)，回到监听模式 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | reset_RSSI | 重置 RSSI |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | Calib_RCosc | 启动内部 RC 振荡器的校准过程 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | clear_false | 重置错误唤醒寄存器(R13<7:0>=00) |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | preset_default | 复位所有寄存器为默认值 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | Calib_RCO_LC | 用外部 LC 调谐模块校准 RC 振荡器 |

6.2.2 写入模式

SPI 在 SCLK 的下降沿采样数据（如下面的图中所示）。

CS 状态 1-0-1 转换预示着在寄存器被写完后写入模式的终止，如图 6-1 和图 6-2 所示。

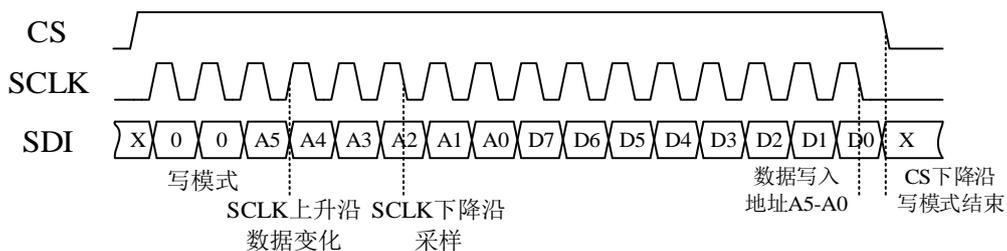


图 6-1 单个字节的写入

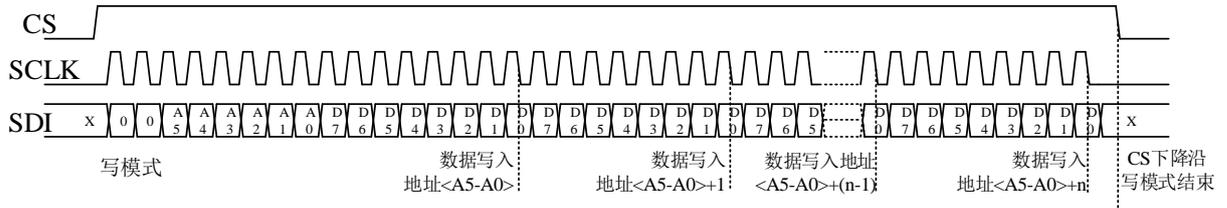


图 6-2 自动递增地址方式下寄存器数据的写入

6.2.3 读取模式

一旦通过 SPI 发送了地址，数据就可以通过 SDO 引脚输出到微控制器。

在读取模式结束后，CS 状态 1-0-1 转换。

为了从连续的地址中读取数据，SPI 必须保持 CS 为高，SCLK 时钟处于活动状态。

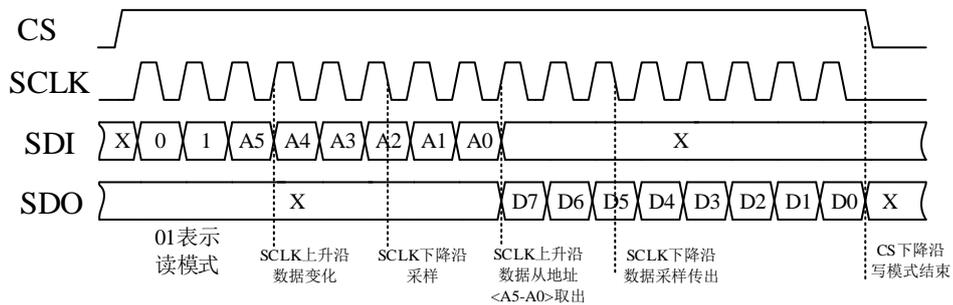


图 6-3 单个寄存器字节的读取

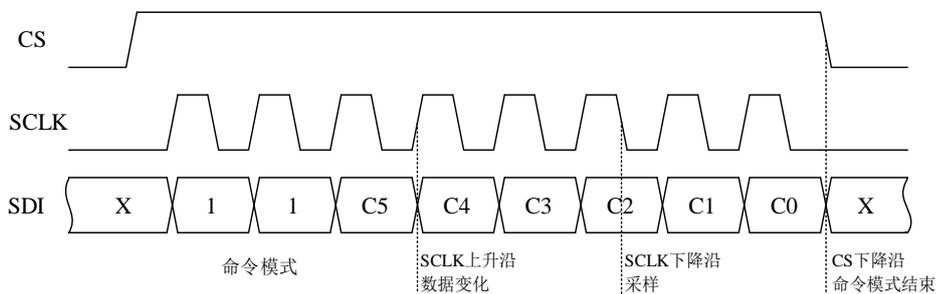


图 6-4 直接命令的发送

6.2.4 SDI 时序

表 6-8 SDI 时序表

| 名称 | 描述 | 最小 | 单位 |
|--------|----------------|-----|----|
| TCCLK | CS 上升沿到数据采样 | 150 | ns |
| TDCLK | 数据上升沿到数据采样 | 100 | ns |
| THCL | SCLK 高电平时间 | 70 | ns |
| TCLK | SCLK 周期 | 166 | ns |
| TCLKCS | 数据采样时刻到 CS 下降沿 | 150 | ns |
| TCST | CS 切换时间 | 500 | ns |

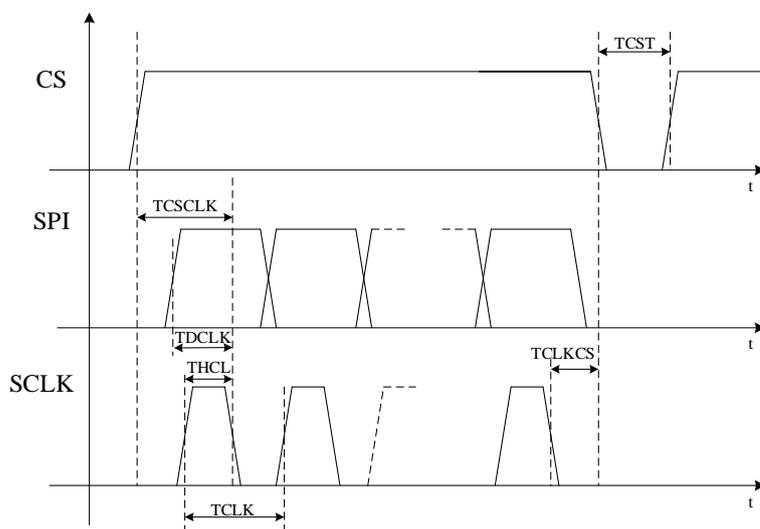


图 6-5 SDI 时序图

7 通道放大器

每个通道都由带自动增益控制 AGC 的可变增益放大器 VGA 和频率检测器构成。监听模式下等待射频信号时，通道放大器的增益设置为最大。频率检测器计算放大后的射频信号的过零点个数，判断载波信号是否符合要求。频率检测完成后，AGC 开始工作。RSSI 代表输入信号强度，是 VGA 增益的反比。如果输入信号强度很大，AGC 会减小 VGA 增益，RSSI 相应变大。

Si3933 可接收 15kHz-150kHz 的载波，一旦频率选定，需配置 R8<7:5>使放大器工作在相应的频段，见表 7-1。

R2<5>=1 开启增益提高。15kHz-40kHz 频段下，自动通过逻辑电路开启该增益提高。

R21<4>=1 时，放大器增益继续提升（前提是 R2<5>必须为 1）。

如果三个通道不需全部使用，可以使用或禁用某个通道。每禁用一个通道，可减少 1.6uA（典型）电流消耗。

7.1 频率检测

频率检测采用过零计数器，并采用时钟产生器做时间基准。根据时钟产生器生成一个宽度为 N 倍时钟周期的时间窗口。如果在两个连续的时间窗口内，计数器都检测到载波有 M 个过零点，则频率检测成功（由于时钟频率是由载波频率决定的，因此一个时间窗口内载波的过零点个数是确定的）。N 值由工作频段决定，见表 7-1。M 值也由工作频段决定，见表 7-2 和表 7-3。M 值是一个容差范围，可以配置 R2<1:0>来调整，范围越小，频率检测越严格。

表 7-1 工作频段和 N 值

| R8<7> | R8<6> | R8<5> | N | 工作频率范围/kHz |
|-------|-------|-------|----|------------|
| 0 | 0 | 0 | 4 | 95-150 |
| 0 | 0 | 1 | 6 | 65-95 |
| 0 | 1 | 0 | 10 | 40-65 |
| 0 | 1 | 1 | 18 | 23-40 |
| 1 | 1 | 1 | 14 | 15-23 |

表 7-2 工作频率 23kHz-150kHz 下的 M 值

| R2<1> | R2<0> | M |
|-------|-------|---|
| | | |

| | | |
|---|---|------|
| 0 | 0 | 16±6 |
| 0 | 1 | 16±4 |
| 1 | 0 | 16±2 |
| 1 | 1 | 禁用 |

表 7-3 工作频率 15kHz-23kHz 下的 M 值

| R2<1> | R2<0> | M |
|-------|-------|-----|
| 0 | 0 | 8±3 |
| 0 | 1 | 8±2 |
| 1 | 0 | 8±1 |
| 1 | 1 | 禁用 |

7.2 RSSI 计算

频率检测结束后，AGC 开始工作。一开始 VGA 增益为最大，AGC 根据接收信号的强度减小 VGA 增益。AGC 需要最多 35 个载波周期进行设置，从而获得稳定的 RSSI。

AGC 的两种工作模式：AGC 仅下降（R1<5>=0），AGC 上升和下降（R1<5>=1）。第一种工作模式，在数据接收的时间段里，AGC 只能降低增益，因此系统保持 RSSI 峰值。第二种工作模式，RSSI 跟随输入信号强度动态变化。

3 个通道的 RSSI 值分别存储在 3 个寄存器中（R10<4:0>、R11<4:0>、R12<4:0>）。RSSI 稳定后，通道选择器将比较出 RSSI 值最大的通道，并冻结 RSSI 值较小的通道。从此，只有被选中通道的 AGC 才有效。

AGC 在两种工作模式下，都可以设置一个工作时间限制。AGC 仅在频率检测后 256us 内工作（载波触发时段内），之后 RSSI 冻结直到芯片唤醒或者 RSSI 复位（直接命令“clear_wake”或“reset_RSSI”）。

直接命令“clear_wake”和“reset_RSSI”可以复位 RSSI。“reset_RSSI”仅复位 VGA，不会影响频率检测结果。这意味着，如果信号一直存在，35 个载波周期内 RSSI 再次稳定。在数据接收阶段，如果 3.5 个符号时间内没有检测到载波信号，将复位 AGC。

为避免最大增益引发错误唤醒（例如环境噪声），可以设置一个较小的初始增益。如表 7-4 所示，这样可能减小错误的频率检测。

表 7-4 初始增益的衰减

| | | | | |
|-------|-------|-------|-------|------|
| R4<3> | R4<2> | R4<1> | R4<0> | 增益衰减 |
|-------|-------|-------|-------|------|

| | | | | |
|---|---|---|--------|-------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 禁用 |
| 0 | 0 | 1 | 0 or 1 | 禁用 |
| 0 | 1 | 0 | 0 or 1 | -4dB |
| 0 | 1 | 1 | 0 or 1 | -8dB |
| 1 | 0 | 0 | 0 or 1 | -12dB |
| 1 | 0 | 1 | 0 or 1 | -16dB |
| 1 | 1 | 0 | 0 or 1 | -20dB |
| 1 | 1 | 1 | 0 or 1 | -24dB |

为了应对更大的电磁场强度，可以开启天线阻尼器（R1<4>=1）。如图 7-1 所示，天线阻尼器是与外部谐振器并行连接的内部电阻。该电阻阻值可以调整，见表 7-5。天线阻尼器通过减小放大器输入端的信号，衰减了外部谐振器的品质因子。如此，谐振器变成了一个阻值更小的电阻（在关心的谐振频率处），降低了谐振器的品质因子，从而增大了通道放大器的线性范围（在更大信号时放大器不饱和）。

表 7-5 天线阻尼器的阻值设置

| R4<5> | R4<4> | 分流电阻 |
|-------|-------|-------|
| 0 | 0 | 1 kΩ |
| 0 | 1 | 3 kΩ |
| 1 | 0 | 9 kΩ |
| 1 | 1 | 27 kΩ |

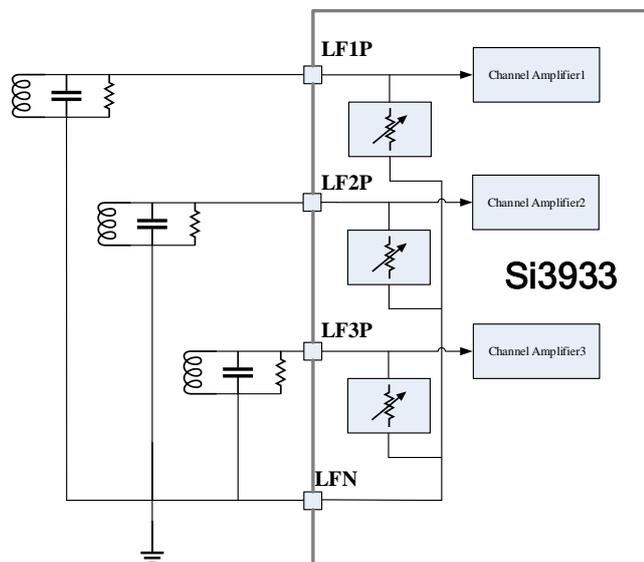


图 7-1 天线阻尼器

8 解调和数据分割

一旦 Si3933 频率检测成功，并且 RSSI 稳定（最多 35 个载波周期），通道选择器将比较所有活跃通道的 RSSI 值，并选择最大 RSSI 值的通道连接到解调器。通道选择器需要 32 个载波周期完成这一操作。被选择通道上的放大的低频载波信号将送至解调器。

解调和数据分割模块如图 8-1 所示。解调器从放大的低频载波信号中恢复出两个信号，包括一快信号和一慢信号。这两个信号再送入数据分割器，即一个迟滞可编程的比较器，最终输出一系列的数字接收位，如图 8-2 所示。

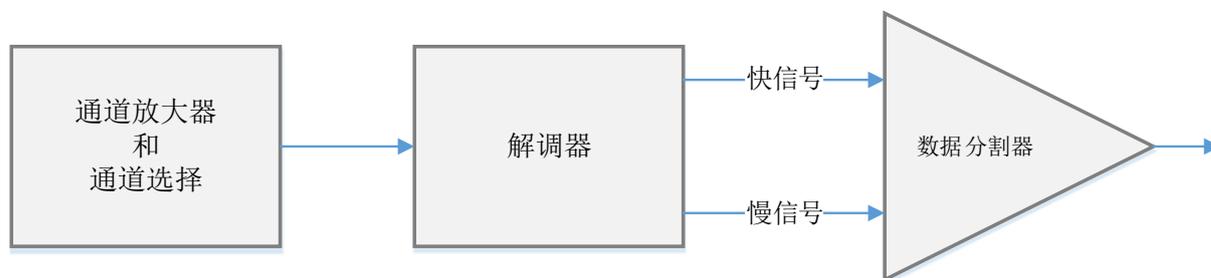


图 8-1 解调器和数据分割比较器

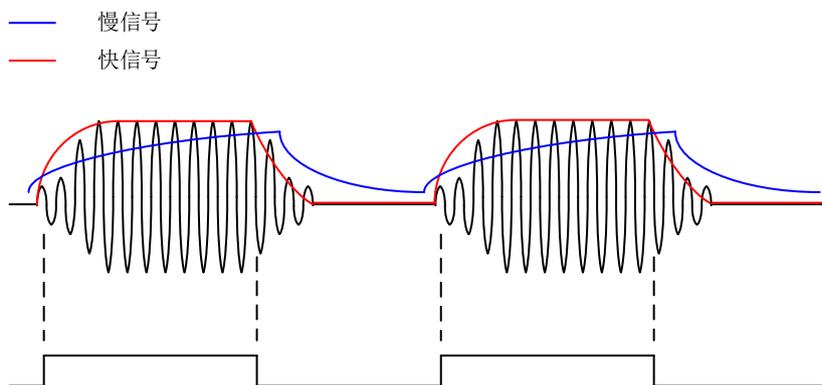


图 8-2 快信号与慢信号的比较方式

解调器可以根据位速率和前导码长度来优化性能。1、快信号的时间常数(R3<2:0>)需要与所希望的符号速率匹配，如表 8-1 所示。然而减小快信号的时间常数意味着更多的噪声将被注入，因为更宽的频带。2、慢信号表现为进入数据的平均值。因此慢信号的时间常数 (R3<5:3>) 越大，越不容易注入噪声，然而需要更长的前导码长度以建立正确的数据。最小前导码长度与慢信号时间常数的关系如表 8-2 所示。

表 8-1 快信号时间常数与数据速率的关系

| R3<2> | R3<1> | R3<0> | 符号速率 (曼彻斯特符号数/s) |
|-------|-------|-------|------------------|
| 0 | 0 | 0 | 4096 |
| 0 | 0 | 1 | 2184 |
| 0 | 1 | 0 | 1490 |
| 0 | 1 | 1 | 1130 |
| 1 | 0 | 0 | 910 |
| 1 | 0 | 1 | 762 |
| 1 | 1 | 0 | 655 |
| 1 | 1 | 1 | 512 |

表 8-2 慢信号时间常数与最小前导码长度的关系

| R3<5> | R3<4> | R3<3> | 最小前导码长度 (ms) |
|-------|-------|-------|--------------|
| 0 | 0 | 0 | 0.8 |
| 0 | 0 | 1 | 1.15 |
| 0 | 1 | 0 | 1.55 |
| 0 | 1 | 1 | 1.9 |
| 1 | 0 | 0 | 2.3 |
| 1 | 0 | 1 | 2.65 |
| 1 | 1 | 0 | 3 |
| 1 | 1 | 1 | 3.5 |

R3<7:6>改变数据分割比较器的迟滞。R3<7>=0, 迟滞阈值为 40mV; R3<7>=1, 迟滞阈值为 20mV。R3<6>=0, 迟滞发生在正跳沿和负跳沿; R3<6>=1, 迟滞仅发生在正跳沿。

慢信号代表解调后信号的平均值 (图 8-2 中的蓝线), 因此可以作为数据分割比较器的参考信号。如果选择的协议不是 50%的占空比 (例如 NRZ 协议可能出现几个连续的 1 或 0), 慢信号将不是一个稳定的参考信号, 这时数据分割比较器可以选择使用绝对阈值 (R1<7>=1), 如图 8-3 所示。在环境不是特别嘈杂的情况下, 绝对阈值也可以减小 (R2<7>=1)。

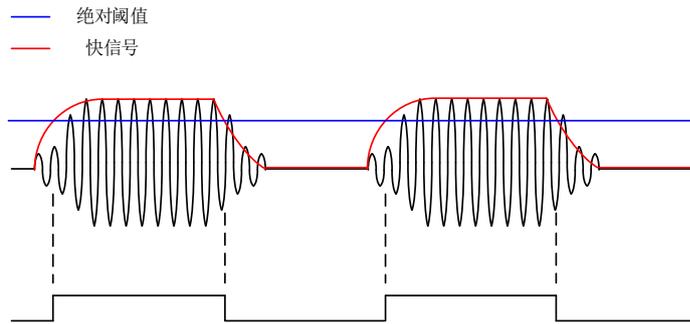


图 8-3 快信号与绝对阈值的比较方式

在使用绝对阈值时，如果输入信号因为发射机环境的物理影响而受到抑制，符号速率需要降低以确保唤醒信号的正确检测。信号的峰值电平必须在符号持续时间的 1/3 之内到达。符号持续时间被定义为 2 倍的位持续时间。位持续时间是时钟周期的函数，由 R7<4:0>决定，如表 8-3 所示。

表 8-3 位持续时间与时钟周期的关系

| R7<4> | R7<3> | R7<2> | R7<1> | R7<0> | 位持续时间与时钟周期的倍数关系 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 4 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 5 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 6 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 7 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 8 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 9 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 10 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 11 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 12 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 13 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 14 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 15 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 16 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 18 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 19 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 20 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 21 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|----|
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 22 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 23 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 24 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 25 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 26 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 27 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 28 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 29 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 30 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 31 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 32 |

9 唤醒规则和曼彻斯特解码

9.1 唤醒规则

Si3933 支持以下唤醒规则：

- 1、仅频率检测（不需向量校验）；
- 2、单向量校验，包括 16 位的向量和 32 位的向量；
- 3、双向量校验（重复一次），包括 16 位的向量和 32 位的向量。

终止唤醒状态可以通过直接命令“clear_wake”（MCU 通过 SPI 发送直接命令）或者超时功能。如果使用后者，MCU 不需要采取任何措施来终止唤醒状态，并且在预定的时间后芯片自动恢复到监听模式。R7<7:5>可以设置超时时间，如表 9-1 所示。

表 9-1 超时时间设置

| R7<7> | R7<6> | R7<5> | 超时时间 |
|-------|-------|-------|--------|
| 0 | 0 | 0 | 超时功能关闭 |
| 0 | 0 | 1 | 50ms |
| 0 | 1 | 0 | 100ms |
| 0 | 1 | 1 | 150ms |
| 1 | 0 | 0 | 200ms |
| 1 | 0 | 1 | 250ms |
| 1 | 1 | 0 | 300ms |
| 1 | 1 | 1 | 350ms |

在不需向量校验的情况下（R1<1>=0），Si3933 可以仅通过频率检测来唤醒，如图 9-1 所示。为了确保 Si393 能够唤醒和 RSSI 稳定，所需的最小载波触发时长见表 9-2。此外，载波触发时长不能超过 155 个时钟产生器周期（晶振、RC 振荡器或外部时钟）。如图 5-1 所示，在检测到载波并且 RSSI 值稳定后，芯片从监听模式直接进入数据接收模式。

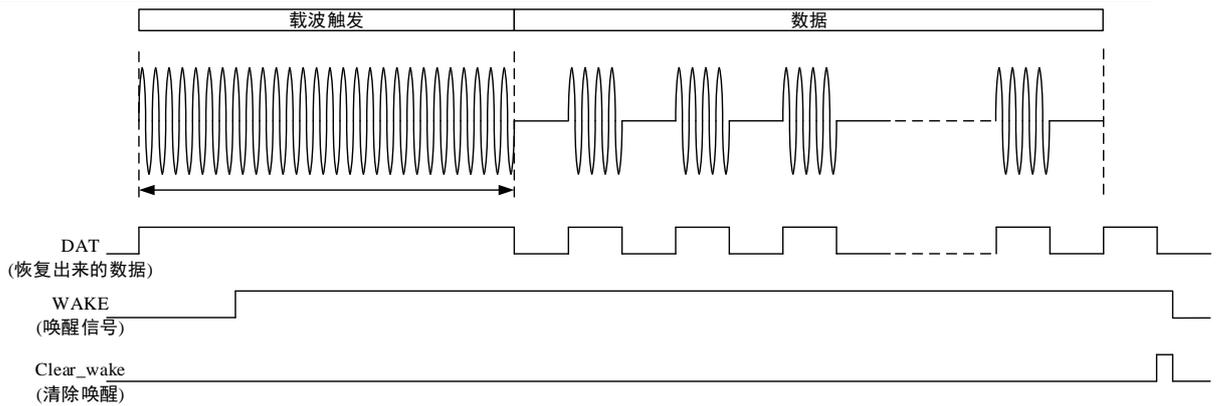


图 9-1 仅频率检测情况下的唤醒过程

表 9-2 最小载波触发时长

| 工作频率范围 (kHz) | 最小载波触发时长 |
|--------------|----------------|
| 95-150 | 16Tclk+16Tcarr |
| 65-95 | 28Tclk+16Tcarr |
| 40-65 | 52Tclk+16Tcarr |
| 23-40 | 96Tclk+16Tcarr |
| 15-23 | 92Tclk+8Tcarr |

注: Tclk 为时钟产生器的周期, Tcarr 为载波周期

在需要向量校验的情况下 ($R1<1>=1$), Si3933 在完成唤醒协议后产生唤醒中断, 如图 9-2 所示。该通信协议由载波触发、前导码 (0101010...) 和 16 位向量构成。在双向量校验的情况下 ($R1<2>=1$), 16 位向量需要重复一次 (两次一样的向量)。向量结束后, 再过一个位, WAKE 引脚拉高, 并开始数据传输。

最小载波触发时长取决于工作频率范围, 见表 9-2。如果载波触发时长短于表 9-2 中的最小值, 则不能保证频率检测。为了完成唤醒协议, 载波触发时长不能超过 155 个时钟产生器周期 (晶振、RC 振荡器或外部时钟)。载波触发后面必须跟随一个分离位和至少 6 位的前导码 (101010)。分离位必须持续半个曼彻斯特符号。前导码和向量的总长度不能超过 30 个符号 (16 位向量检测) 或者 46 个符号 (32 位向量检测)。

开/关模式下 ($R0<5>=1$), 最小载波触发时长必须根据关断时间来延长。

载波触发时长长于表 9-2 中的最小值, 或者前导码位数长于前面所述的最小值, $R13<7:0>$ 记录一次错误唤醒事件。

扫描模式下 ($R0<4>=1$), 最小载波触发时长见表 9-3。

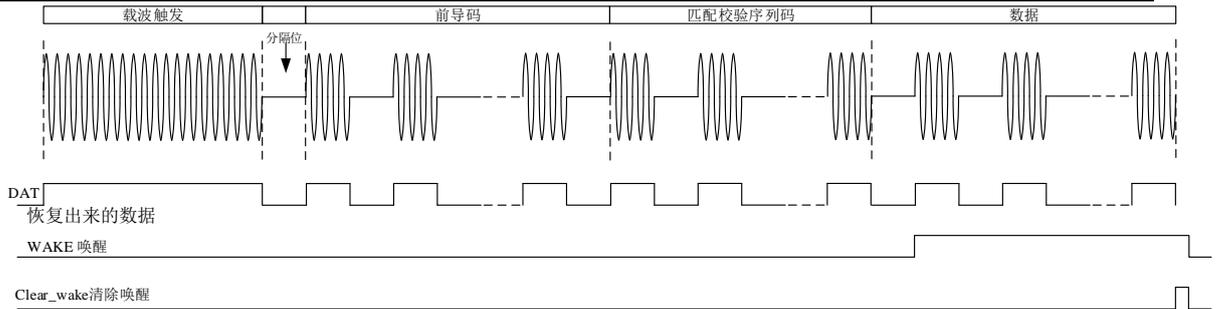


图 9-2 向量校验情况下的唤醒过程

表 9-3 扫描模式下最小载波触发时长

| 工作频率范围 (kHz) | 扫描模式下最小载波触发时长 |
|--------------|-----------------|
| 95-150 | 80Tclk+16Tcarr |
| 65-95 | 92Tclk+16Tcarr |
| 40-65 | 180Tclk+16Tcarr |
| 23-40 | 224Tclk+16Tcarr |
| 15-23 | 220Tclk+8Tcarr |

注: Tclk 为时钟产生器的周期, Tcarr 为载波周期

9.2 校验器

为了防止 Si3933 因噪声和干扰而唤醒 MCU，内部校验器检查从数据分割器传来的位序列是否与存储的向量相对应。所需的向量存储在 R5<7:0>和 R6<7:0>中。R1<1>=1 为校验器使能信号，而且只在频率检测之后进行校验。

只有位序列（向量）及其时序（单个位的持续时间）都匹配，向量校验才算成功（WAKE 引脚拉高）。

Si3933 能够校验输入的向量，不需要外部 MCU 的帮助。向量必须是曼彻斯特编码形式的。在曼彻斯特码中，每个“符号”由两个“位”构成（位 1-0 表示符号 1，位 0-1 表示符号 0）。图 9-3 所示的是 3 个符号（101）的曼彻斯特编码过程。在曼彻斯特编码的比特流中，不可能出现三个连续的 0 或 1，这有助于恢复时钟信号。

位持续时间是时钟产生器周期的关系，由 R7<4:0>定义，见表 8-3。

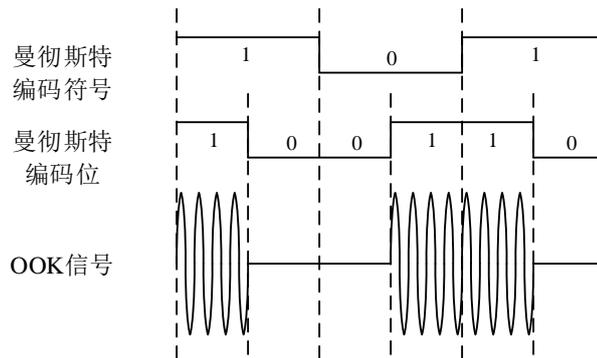


图 9-3 曼彻斯特编码过程

用户可以定义存储在 $R5<7:0>$ 和 $R6<7:0>$ 中的用于校验的向量，也可以决定该向量是位，还是符号。 $R0<7>=0$ ，存储的向量为位，一共 16 个位（对应 8 个符号）； $R0<7>=1$ ，存储的向量为符号，一共 16 个符号（对应 32 个位）。向量的个数是 2 的 SYM 次方，其中 SYM 是曼彻斯特符号的个数。因此前者有 256 (2^8) 种可能，后者有 65536 (2^{16}) 种可能。

9.3 错误唤醒寄存器

在需要向量校验的情况下，Si3933 唤醒有两步：1、频率检测，检查接收载波的频率；2、向量校验，检查解调后的向量是否与存储的向量相匹配。

如果干扰或噪声克服第一步频率检测，但不产生有效的向量，这时就发生一次错误唤醒请求。每发生一次，计数器加一，并且计数器的值存储在错误唤醒寄存器中。微控制器可以访问错误唤醒寄存器，判断周围环境的噪声，并做出应对（例如频率检测时减小 LNA 增益，Si3933 短暂掉电等等），如图 9-4 所示。错误唤醒寄存器是一个使系统快速适应噪声环境的有用工具，因此避免了错误唤醒事件。

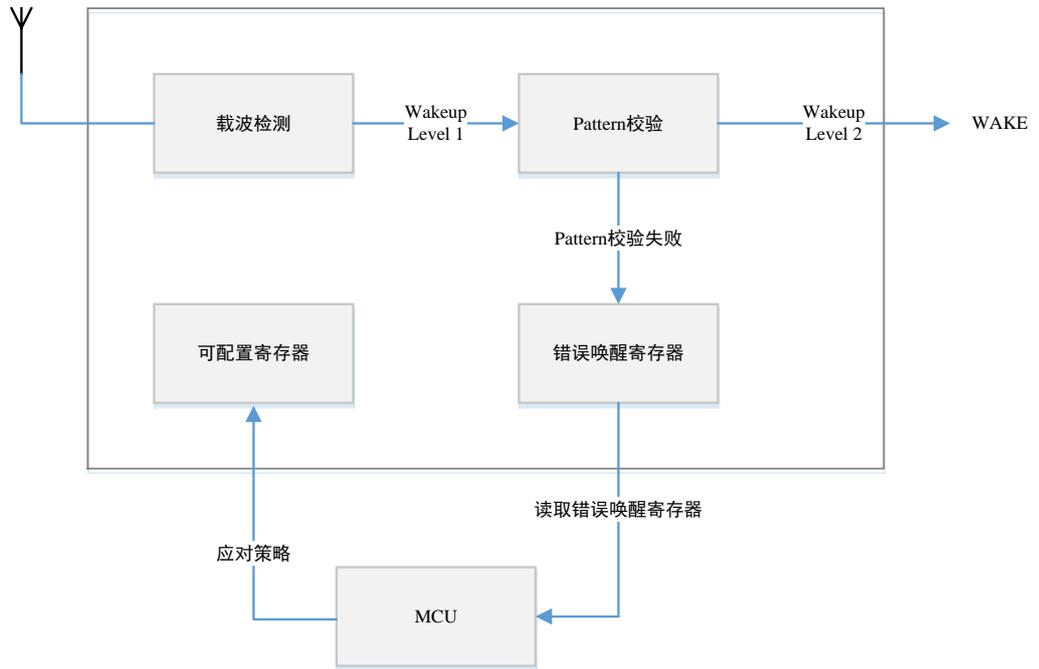


图 9-4 错误唤醒寄存器

9.4 曼彻斯特解码和时钟恢复

在曼彻斯特解码器使能 ($R1<3>=1$) 的情况下, Si3933 自动解码输入进来的曼彻斯特特位。曼彻斯特解码数据显示在引脚 DAT 上, 曼彻斯特恢复的时钟显示在引脚 CL_DAT 上。CL_DAT 时钟的上升沿时, DAT 数据才稳定, 如图 9-5 所示。

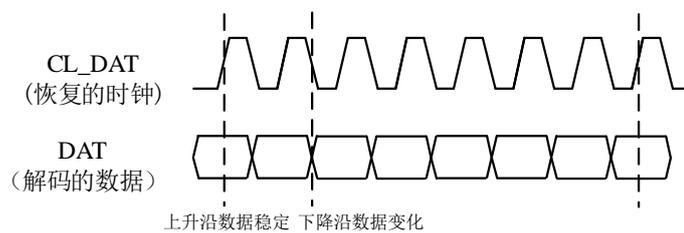


图 9-5 带时钟恢复的曼彻斯特解码

如果发生曼彻斯特时序错误, SPO 变高并维持 4 个时钟周期 (晶振、RC 振荡器或外部时钟)。

在曼彻斯特解码器未使能 ($R1<3>=0$) 的情况下, 引脚 DAT 显示未解码的数据。

10 时钟产生电路

10.1 概述

Si3933 的时钟生成器可以是晶体振荡器 ($R1<0>=1$)、内部 RC 振荡器 ($R1<0>=0$) 或外部时钟源 ($R1<0>=1$)。晶体振荡器具有较高的频率精度和较高的电流消耗，并且需要三个外部元件（晶体和两个电容器）。RC 振荡器是完全集成的，可以校准以提高其频率精度。假如外部已有一个数字时钟，可以通过引脚 XOUT 直接使用它（此时 XIN 连接到 VCC）。

无论选择哪种时钟生成器，时钟生成器的频率必须根据载波频率来设置。表 10-1 显示了时钟生成器频率和载波频率以及工作频带的关系。

表 10-1 时钟生成器频率和载波频率的关系

| 载波频率 (kHz) | 时钟频率 |
|------------|------------------------------------|
| 95-150 | $f = f_{carr} \times \frac{1}{8}$ |
| 65-95 | $f = f_{carr} \times \frac{3}{8}$ |
| 40-65 | $f = f_{carr} \times \frac{5}{8}$ |
| 23-40 | $f = f_{carr} \times \frac{9}{8}$ |
| 15-23 | $f = f_{carr} \times \frac{14}{4}$ |

通过写入 $R2<3:2>=11$ 和 $R16<7>=1$ ，可以在 CL_DAT 引脚上显示时钟生成器的频率。

10.2 晶体振荡器

如果用户决定使用晶体振荡器作为参考时钟，在频率检测的容差设置放松的情况下

(R2<1:0>=00)，可以使用 32.768kHz 的石英。如果不是这样的话，那么表 10-1 显示了如何选择石英的频率。

如果 Si3933 在 23-40kHz 带宽内工作，则不推荐使用 XTAL 振荡器以避免输入天线和石英晶体之间的耦合。

表 10-2 晶体振荡器参数表

| 参数 | 条件 | 最小值 | 典型值 | 最大值 | 单位 |
|----------|--------------|-----|--------|-----|------------|
| 晶体等效串联电阻 | | - | - | 60 | K Ω |
| 最小频率 | 32.768kHz 晶体 | - | 25 | - | kHz |
| 典型频率 | | - | 32.768 | - | kHz |
| 最大频率 | | - | 45 | - | kHz |
| 起振时间 | 随晶体而定 | - | 1 | - | s |
| 占空比 | | 45 | 50 | 55 | % |
| 电流消耗 | | - | 560 | - | nA |

10.3 RC 振荡器

表 10-3 RC 振荡器参数

| 参数 | 条件 | 最小值 | 典型值 | 最大值 | 单位 |
|------|--------|-----|-----|-----|--------|
| 校准时间 | 参考时钟周期 | 65 | - | - | cycles |
| 电流消耗 | | - | 730 | - | nA |

如果向量校验和曼彻斯特解码器未被使能 (R1<1>=0 和 R1<3>=0)，则不需要对 RC 振荡器进行校准。如果启用向量校验和曼彻斯特解码器，则必须对 RC 振荡器进行校准。

RC 振荡器的校准可以通过以下两种不同的方法实现：

- (1) 通过 SPI，主机 (MCU) 必须能够提供一个参考时钟的 65 个时钟脉冲。在这种情况下，主机必须具有一个准确的参考时钟 (石英晶体，谐振器等)。
- (2) 使用基于天线谐振器的内部校准程序。采用这种校准方法，RC 振荡器会根据工作频带自动调整到适当的频率。校准的精度取决于通道 1 的谐振器 (连接到 LF1P 的 LC) 的公差。

RC 振荡器：通过 SPI 校准。Si3933 接收到直接命令 Calib_RCosc 时，校准开始。由于芯片上没有非易失性存储器，所以每次电池更换后都必须进行校准。由于时钟生成器定义了频率检测的时间基准，所以其频率随载波频率而定。来自主机 (MCU) 的参考

时钟频率的选择，见表 10-1。

在通过 SPI 校准 RC 振荡器时，需要先将片选引脚（CS）设置为高，然后通过 SPI 发送直接命令 Calib_RCosc。再然后，必须在时钟总线（SCLK）上发送参考时钟的 65 个数字时钟（例如，125kHz/4=31.25kHz），见图 10-1。在此之后，片选引脚（CS）必须被拉低。

在第 65 个参考时钟边沿之后，校准有效，并存储在一个易失性存储器中。假如 RC 振荡器关闭，或者发生上电复位（例如电池更换），则必须重新校准。

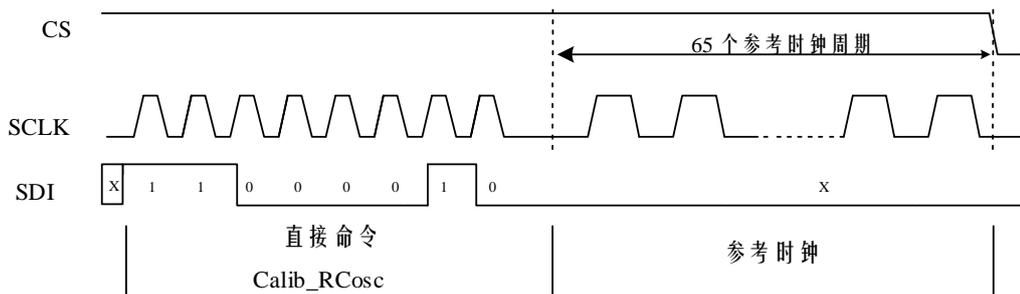


图 10-1 通过 SPI 校准 RC 振荡器

RC 振荡器：自校准。此过程使用连接到通道 1（LF1P）的 LC 电路，LC 电路不是当天线使用，而是一个振荡器的谐振器。内部 LC 振荡器通过多路选择器连接到外部 LC 电路。

LC 振荡器生成的时钟与 LC 电路的谐振频率一致。在典型应用中，用户设计外部谐振器，使外部 LC 电路的谐振频率尽可能接近载波频率。振荡频率与 LC 时间常数的数学关系是：

$$f_{LC} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

通过 SPI 发送直接命令 Calib_RCO_LC，当 R14<7>=1 时，RC 振荡器开始校准。根据表 10-1，RC 振荡器校准后的频率取决于载波频率，并且被自动设置以更好地执行频率检测。

10.4 外部时钟源

使用外部信号作为 Si3933 的时钟，需要使能外部时钟生成器（R2<6>=1）和晶体振荡器（R1<0>=1）。外部时钟可以通过引脚 XOUT 直接使用，此时引脚 XIN 必须连接到 VCC。

表 10-4 外部时钟参数

| 参数 | 最小值 | 典型值 | 最大值 | 单位 |
|-------|-----|-----|---------|----|
| 输入低电平 | 0 | - | 0.1*VCC | V |

| | | | | |
|-------|---------|---|-----|----|
| 输入高电平 | 0.9*VCC | - | VCC | V |
| 上升时间 | - | - | 3 | μs |
| 下降时间 | - | - | 3 | μs |

11 天线调谐

SI3933 内部集成精细的天线调谐功能。如图 11-1 所示，Si3933 在主机（MCU）的帮助下实现调谐功能。

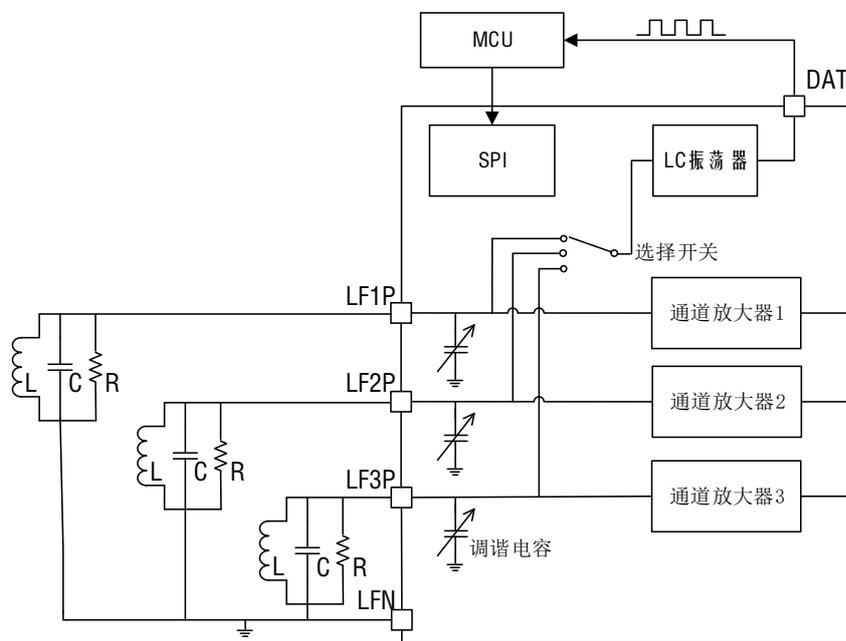


图 11-1 天线调谐

三个天线都可以通过内部电容微调模块实现调谐。电容可以通过寄存器位 R17<4:0>，R18<4:0>和 R19<4:0>控制连接和断开（增加或减少外部谐振器的并联电容）。电容调谐范围为 0~31pF，步进为 1pF。

表 11-1 引脚 LF1P 的并联调谐电容

| R17 | 引脚 LF1P 的并联调谐电容 |
|----------|-----------------|
| R17<0>=1 | 增加 1pF |
| R17<1>=1 | 增加 2pF |
| R17<2>=1 | 增加 4pF |

| | |
|----------|---------|
| R17<3>=1 | 增加 8pF |
| R17<4>=1 | 增加 16pF |

表 11-2 引脚 LF2P 的并联调谐电容

| R18 | 引脚 LF2P 的并联调谐电容 |
|----------|-----------------|
| R18<0>=1 | 增加 1pF |
| R18<1>=1 | 增加 2pF |
| R18<2>=1 | 增加 4pF |
| R18<3>=1 | 增加 8pF |
| R18<4>=1 | 增加 16pF |

表 11-3 引脚 LF3P 的并联调谐电容

| R19 | 引脚 LF3P 的并联调谐电容 |
|----------|-----------------|
| R19<0>=1 | 增加 1pF |
| R19<1>=1 | 增加 2pF |
| R19<2>=1 | 增加 4pF |
| R19<3>=1 | 增加 8pF |
| R19<4>=1 | 增加 16pF |

这三个通道可以独立调谐。主机（MCU）必须将 LC 振荡器与天线连接起来，以测量引脚 DAT 上的谐振频率。主机应测量 DAT 引脚上的频率，然后更改寄存器设置即可将其调谐到尽可能接近载波频率的标称值。通过设置寄存器位 R16<2:0>，可以将 LC 振荡器连接到三个不同的天线。

表 11-4 LC 显示通道选择

| 寄存器位 | 名称 | 读写类型 | 默认值 | 描述 |
|--------|-------------|------|------|-----------------------|
| R16<2> | LC_OSC_MUX3 | R/W | 1'b0 | 在 DAT 引脚输出 LF3P 的谐振频率 |
| R16<1> | LC_OSC_MUX2 | R/W | 1'b0 | 在 DAT 引脚输出 LF2P 的谐振频率 |
| R16<0> | LC_OSC_MUX1 | R/W | 1'b0 | 在 DAT 引脚输出 LF1P 的谐振频率 |

12 封装尺寸

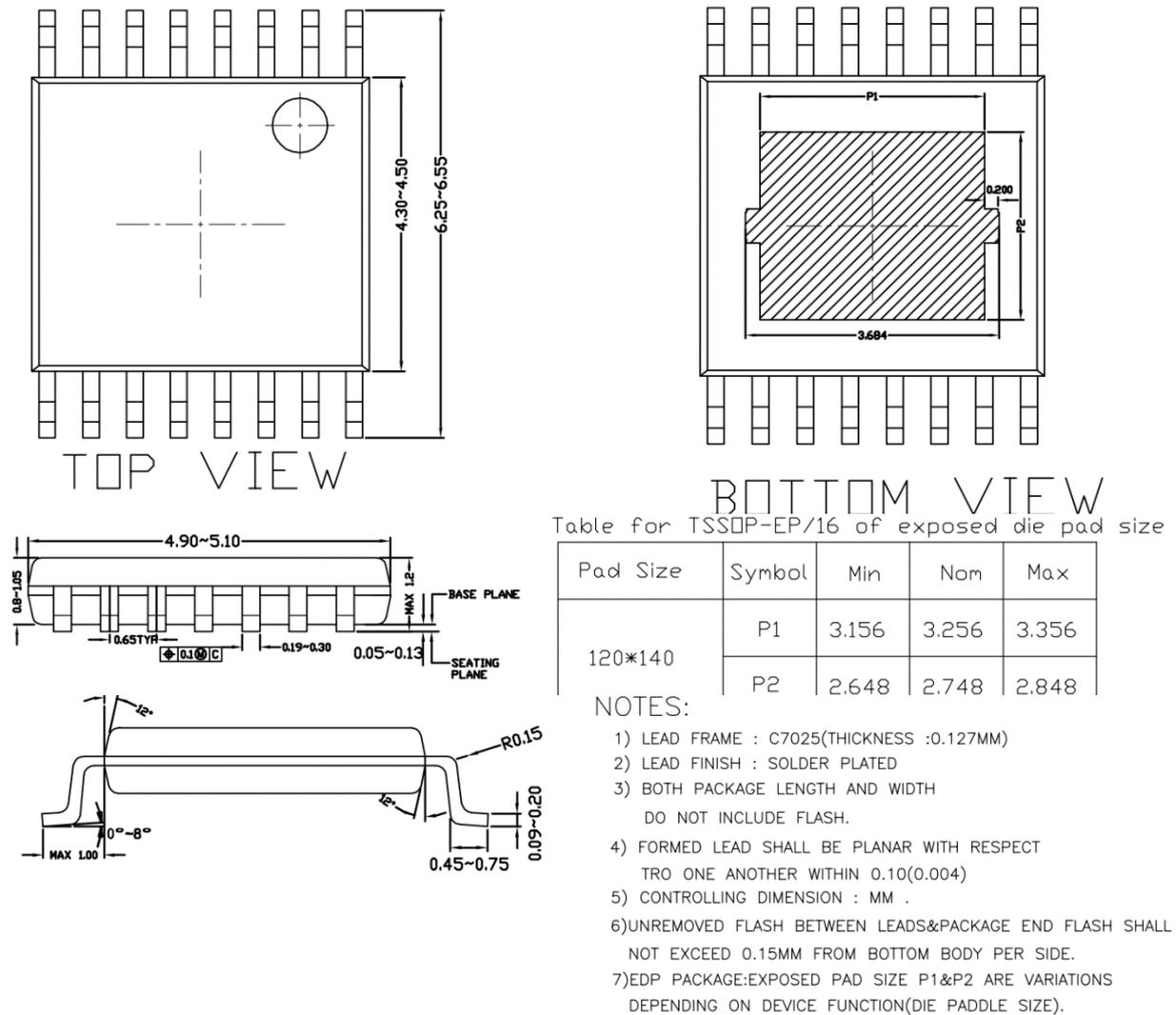


图 12-1 Si3933 TSSOP-16 封装尺寸

13 修改记录

| 版本 | 修改日期 | 修改内容 | 修改人员 |
|------|------------|------|-----------|
| V1.0 | 2021/11/11 | 初稿 | ANA Group |

14 技术支持与联系方式

南京中科微电子有限公司 技术支持中心

地址：南京市玄武区徐庄软件园研发三区 B 栋 201

电话：025-68517780

邮箱：support@csmic.ac.cn

Preliminary

Si3933

X-ON Electronics

Largest Supplier of Electrical and Electronic Components

Click to view similar products for [RF Transceiver](#) category:

Click to view products by [Zhongke](#) manufacturer:

Other Similar products are found below :

[BCM43217KMLG](#) [TRF6900PT](#) [NCH-RSL15-284-101Q40-ACG](#) [NCH-RSL15-512-101Q40-ACG](#) [CA-IF4220NF](#) [RTL8231-GR](#)

[AWR2243ABGABLRQ1](#) [AD9364BBCZREEL](#) [ADRV9025ABBCZ](#) [CST92P12-SSOP24](#) [DL-PAN3031-S-433](#)

[BGT60LTR11AIP6327XUMA2](#) [SYN470R](#) [AXM0F343-256-1-TX40](#) [AXM0F343-64-1-TX40](#) [PAN3020BL](#) [PAN3020BV](#) [RTL8188GU-](#)

[VF0-CG](#) [RTL8370MBI-CG](#) [RTL8188FTV-VQ1-CG](#) [RTL8211FD-VX-CG](#) [RTL8723DS-CG](#) [RTL8189ETV-CG](#) [RTL8376-GR](#) [RTL8822BU-](#)

[CG](#) [CC8531RHAR](#) [VX1526L](#) [VX901M](#) [VT211R](#) [VX1527L](#) [VX932X](#) [VX2241L](#) [CH9140](#) [IWR6243ABGABLR](#) [ADBMS6822WCCSZ-RL](#)

[RTL8367RB-VC-CG](#) [RTL8761BTV-CG](#) [SI4461-C2A-GMR](#) [CC1260RGZT](#) [NRF51822-CEAA-R \(E0\)](#) [BGT24LTR11N16E6327XTSA1](#)

[725TRX8-16K](#) [SI4455-C2A-GMR](#) [S2-LPQTR](#) [AT86RF232-ZX](#) [SI4463-C2A-GMR](#) [SI4463-B1B-ZM0R](#) [CC8530RHAR](#) [CC1201RHBR](#)

[SX1281IMLTRT](#)