

STM32WL LoRa 通信中从 Tx 发射状态切换到 Rx 接收状态耗时过长问题

关键字: LoRa, Tx/Rx 状态切换, 耗时

1. 问题产生

客户反馈 STM32WL 在做 LoRa 应用时, 射频 Radio.Init 初始化完成后, 进入 Radio.Rx 状态, 或者从 Tx 状态切换到 Rx 状态 (txDone 发生后), 此过程需耗时 10ms。10ms 这个过长的耗时过会导致后续接收应用数据丢失。客户 10ms 耗时 log, 如图一红框部分所示:

```

43s619:HDR OK
43s715:OnRx:Done43s715:RssiValue=-13 dBm, SnrValue=1343s710:...PING43s710:Master Tx
start43s918:OnTx:Done43s921:Rx starthickrecv[4] = 44976, hickrecv[5] = 44986
43s980:PRE OK
43s999:HDR OK
44s095:OnRx:Done44s095:RssiValue=-13 dBm, SnrValue=1344s090:...PING44s090:Master Tx
start44s298:OnTx:Done44s301:Rx starthickrecv[4] = 45365, hickrecv[5] = 45375
44s360:PRE OK
44s378:HDR OK
44s475:OnRx:Done44s475:RssiValue=-13 dBm, SnrValue=1344s478:...PING44s478:Master Tx
start44s678:OnTx:Done44s681:Rx starthickrecv[4] = 45754, hickrecv[5] = 45764
44s740:PRE OK
44s758:HDR OK
44s855:OnRx:Done44s855:RssiValue=-13 dBm, SnrValue=1344s858:...PING44s858:Master Tx
start45s058:OnTx:Done45s061:Rx starthickrecv[4] = 46143, hickrecv[5] = 46153
45s120:PRE OK
45s138:HDR OK
45s235:OnRx:Done45s235:RssiValue=-13 dBm, SnrValue=1345s238:...PING45s238:Master Tx
start45s438:OnTx:Done45s441:Rx starthickrecv[4] = 46532, hickrecv[5] = 46542
45s499:PRE OK
45s518:HDR OK
45s615:OnRx:Done45s615:RssiValue=-13 dBm, SnrValue=1345s618:...PING45s618:Master Tx
start45s818:OnTx:Done45s821:Rx starthickrecv[4] = 46921, hickrecv[5] = 46931
45s878:PRE OK
45s898:HDR OK
    
```

图一

2. 问题确认

针对客户遇到的问题, 在 STM32WL Nucleo 板上运行 STM32WL Cube 包里的 LoRaWAN_AT_Slave 例程进行测试。如图二, 在 Tx 发送完毕, 射频模块进入 Standby 状态, 再到切换到 Rx 接收状态。发现客户其实测量的是从 Standby mode 切换到 Rx 接收状态整个过程的耗时, 耗时确实为 10ms (图二, 红框部分)。从调试 log 看, 问题也可以简化为 Standby mode 切换到 Rx 接收状态耗时过长。原因是射频模块的状态机在完成

Tx 发射后，一般需进入到 Standby mode,再切换到其他工作模式，比如 Rx。而耗时长主要出现在 Standby mode 切换到 Rx 接收状态过程。

```

COM22 - Tera Term VT
File Edit Setup Control Window Help
APP VERSION= U1.0.0
0s031:SUBGRF_SetStandby
0s031:SUBGRF_SetRx
0s041:SUBGRF_SetRx ready
2s031:OnRxTimeout
2s033:Master Tx start
2s224:OnTxDone
2s227:Rx start
2s227:SUBGRF_SetStandby
2s227:SUBGRF_SetRx
2s237:SUBGRF_SetRx ready
2s237:Rx start ready
4s227:OnRxTimeout
4s229:Master Tx start
4s420:OnTxDone
4s423:Rx start
4s423:SUBGRF_SetStandby
4s423:SUBGRF_SetRx
4s433:SUBGRF_SetRx ready
4s433:Rx start ready
6s423:OnRxTimeout
6s425:Master Tx start
6s617:OnTxDone
6s620:Rx start
    
```

图二

3. 问题分析

针对这个问题，查阅 RM0461,如图三所示

Mode transition	SPI command (sub-GHz radio event)	t _{swMODE} typical (μs)
Sleep-to-Standby (no data retention)	SPI NSS low 20 μs	3500
Sleep-to-Standby (with data retention)	SPI NSS low 20 μs (RTC end-of-count)	340
Standby-to-Standby with HSE32	Set_Standby ()	31
Standby (HSE32 off)-to-FS ⁽¹⁾	Set_Fs ()	50
Standby (HSE32 off)-to-TX ⁽²⁾	all Set_Tx ()	126
Standby (HSE32 off)-to-RX ⁽³⁾	Set_Rx (), Set_Cad ()	83
Standby (HSE32 on)-to-FS ⁽¹⁾	Set_Fs ()	40
Standby (HSE32 on)-to-TX ⁽²⁾	all Set_Tx ()	105
Standby (HSE32 on)-to-RX ⁽³⁾	Set_Rx (), Set_Cad ()	62
FS-to-TX ⁽²⁾	all Set_Tx ()	76
FS-to-RX ⁽³⁾	Set_Rx (), Set_Cad ()	41

图三

按手册描述理论上从 Standby 切换到 Rx 耗时应该为 62us。而在 STM32WL Nucleo 板上测试的结果为 10ms。这个耗时差异是怎么产生的呢？

这里我们首先检查是否 **Standby mode** 影响了后续 Rx 的切换，在 RM0461 手册上有以下描述，见图四：

Standby mode

The Standby mode is entered from the Calibration mode and can furthermore be entered by `Set_standby()` command.

In Standby mode, BUSY is cleared. The software must configure the sub-GHz radio for FS, TX, RX or Sleep mode. By default, in Standby mode, the sub-GHz radio is clocked by the sub-GHz RC 13 MHz. For time critical applications, HSE32 can be turned on. The use of RC 13 MHz or HSE32 is selected by `Set_standby()` command.

图四

即在 **Standby mode** 时射频模块工作的时钟可以选择 RC 13MHz 或者 HSE32。而且在对时间敏感的应用选择 HSE32。时钟的选择可以通过 `Set_Standby()` 指令，如图五。

Set_Standby() command

`Set_standby(StandbyCfg)` is used to set the sub-GHz radio in Standby mode. The StandbyCfg parameter allows some optional functions to be selected in Standby mode.

0	1
Opcode	StandbyCfg
w	w

byte 0 bits 7:0 **Opcode**: 0x80

byte 1 bits 7:1 Reserved, must be kept at reset value.

bit 0 **StandbyCfg_StandbyClk**: set clock in Standby mode

0: RC 13 MHz used in Standby mode

1: HSE32 used in Standby mode (Standby with HSE32)

图五

然后分别对 **Standby mode** 下射频模块时钟分别选择 RC 13MHz 和 HSE32 时钟进行测试，看在两种时钟下，从 **Standby mode** 切换到 Rx 接收状态的耗时有没有差异。具体函数 `SUBGRF_SetStandby` 配置的参数为：`STDBY_RC`（RC 13 MHz used in Standby mode）和 `STDBY_XOSC`（HSE32 used in Standby mode (Standby with HSE32)）

(1) **Standby mode** 下射频模块时钟选择 RC 13MHz，具体代码，如图六：

```

static void RadioRx( uint32_t timeout )
{
    /* Radio IRQ is set to DIO1 by default */
    SUBGRF_SetDioIrqParams( IRQ_RADIO_ALL, //IRQ_RX_DONE | IRQ_RX_TX_TIMEOUT,
                           IRQ_RADIO_ALL, //IRQ_RX_DONE | IRQ_RX_TX_TIMEOUT,
                           IRQ_RADIO_NONE,
                           IRQ_RADIO_NONE );

    if( timeout != 0 )
    {
        TimerSetValue( &RxTimeoutTimer, timeout );
        TimerStart( &RxTimeoutTimer );
    }

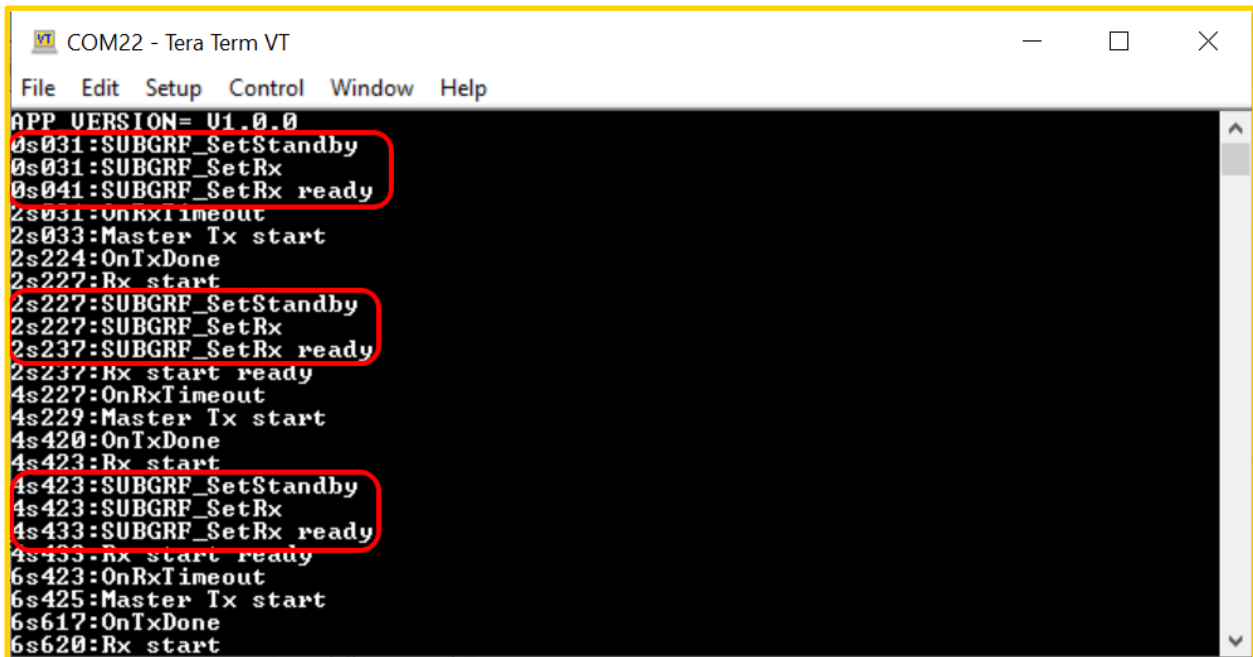
    /* ST_WORKAROUND_BEGIN : Set the debug pin and update the radio switch */
    /* Set DBG pin */
    DBG_GPIO_RADIO_RX(SET);

    /* RF switch configuration */
    SUBGRF_SetSwitch(SubgRf.AntSwitchPaSelect, RFSWITCH_RX);
    /* ST_WORKAROUND_END */

    if( SubgRf.RxContinuous == true )
    {
        APP_LOG(TS_ON, VLEVEL_L, "SUBGRF_SetStandby \n\r");
        SUBGRF_SetStandby(STDBY_RC );// standby mode 选择 RC 13MHz
        APP_LOG(TS_ON, VLEVEL_L, "SUBGRF_SetRx \n\r");
        SUBGRF_SetRx( 0xFFFFFFFF ); // Rx Continuous
        APP_LOG(TS_ON, VLEVEL_L, "SUBGRF_SetRx ready\n\r");
    }
    else
    {
        SUBGRF_SetRx( SubgRf.RxTimeout << 6 );
    }
}
    
```

图六

测试结果，见图七：



```

COM22 - Tera Term VT
File Edit Setup Control Window Help
APP VERSION= U1.0.0
0s031:SUBGRF_SetStandby
0s031:SUBGRF_SetRx
0s041:SUBGRF_SetRx ready
2s031:OnRxTimeout
2s033:Master Tx start
2s224:OnTxDone
2s227:Rx start
2s227:SUBGRF_SetStandby
2s227:SUBGRF_SetRx
2s237:SUBGRF_SetRx ready
2s237:Rx start ready
4s227:OnRxTimeout
4s229:Master Tx start
4s420:OnTxDone
4s423:Rx start
4s423:SUBGRF_SetStandby
4s423:SUBGRF_SetRx
4s433:SUBGRF_SetRx ready
4s433:Rx start ready
6s423:OnRxTimeout
6s425:Master Tx start
6s617:OnTxDone
6s620:Rx start
    
```

图七

(2) Standby mode 下射频模块时钟选择 HSE32，具体代码，如图八：

```

static void RadioRx( uint32_t timeout )
{
    /* Radio IRQ is set to DIO1 by default */
    SUBGRF_SetDioIrqParams( IRQ_RADIO_ALL, //IRQ_RX_DONE | IRQ_RX_TX_TIMEOUT,
                           IRQ_RADIO_ALL, //IRQ_RX_DONE | IRQ_RX_TX_TIMEOUT,
                           IRQ_RADIO_NONE,
                           IRQ_RADIO_NONE );

    if( timeout != 0 )
    {
        TimerSetValue( &RxTimeoutTimer, timeout );
        TimerStart( &RxTimeoutTimer );
    }

    /* ST_WORKAROUND_BEGIN : Set the debug pin and update the radio switch */
    /* Set DBG pin */
    DBG_GPIO_RADIO_RX(SET);

    /* RF switch configuration */
    SUBGRF_SetSwitch(SubgRf.AntSwitchPaSelect, RFSWITCH_RX);
    /* ST_WORKAROUND_END */

    if( SubgRf.RxContinuous == true )
    {
        APP_LOG(TS_ON, VLEVEL_L, "SUBGRF_SetStandby \n\r");
        SUBGRF_SetStandby(STDBY_XOSC); // standby mode 选择 HSE32
        APP_LOG(TS_ON, VLEVEL_L, "SUBGRF_SetRx \n\r");
    }
}
    
```

```

SUBGRF_SetRx( 0xFFFFF ); // Rx Continuous
APP_LOG(TS_ON, VLEVEL_L, "SUBGRF_SetRx ready\n\r");
}
else
{
    SUBGRF_SetRx( SubGrf.RxTimeout << 6 );
}
}
    
```

图八

测试结果，见图九：

```

COM22 - Tera Term VT
File Edit Setup Control Window Help
APP VERSION= 01.0.0
0s031:SUBGRF_SetStandby
0s041:SUBGRF_SetRx
0s041:SUBGRF_SetRx ready
2s031:OnRxTimeout
2s033:Master Tx start
2s224:OnTxDone
2s227:Rx start
2s227:SUBGRF_SetStandby
2s237:SUBGRF_SetRx
2s237:SUBGRF_SetRx ready
2s237:Rx start ready
4s227:OnRxTimeout
4s229:Master Tx start
4s420:OnTxDone
4s423:Rx start
4s423:SUBGRF_SetStandby
4s433:SUBGRF_SetRx
4s433:SUBGRF_SetRx ready
4s433:Rx start ready
6s423:OnRxTimeout
6s425:Master Tx start
6s617:OnTxDone
6s620:Rx start
    
```

图九

综合以上测试，可以发现在 Standby mode 下改变射频模块的工作时钟，并不会改善从 Standby mode 切换到 Rx 接收状态的耗时，耗时仍为 10ms。

4. 问题解决

后面问题反馈到 Division，Division 给出的答复是当 STM32WL 采用 TCXO 作为 32MHz 时钟源时，TCXO 的唤醒时间影响了 Standby mode 到 Rx 状态的切换时间。在 STM32 CubeWL 开发包里，TCXO 唤醒时间 TCXO_WAKE_UP_TIME 被设置为 10ms。具体修改前代码在 SubGHz_Phys/Target/radio_board_if.h，见图十

```

/* Radio maximum wakeup time (in ms) */
#define RF_WAKEUP_TIME 10U
    
```

图十 修改前代码

而这个 RF_WAKEUP_TIME 的值可以修改为 1ms, 具体见 SubGHz_Phys/Target/radio_board_if.h 修改后代码, 如图十一

```
/* Radio maximum wakeup time (in ms) */
#define RF_WAKEUP_TIME                1U
```

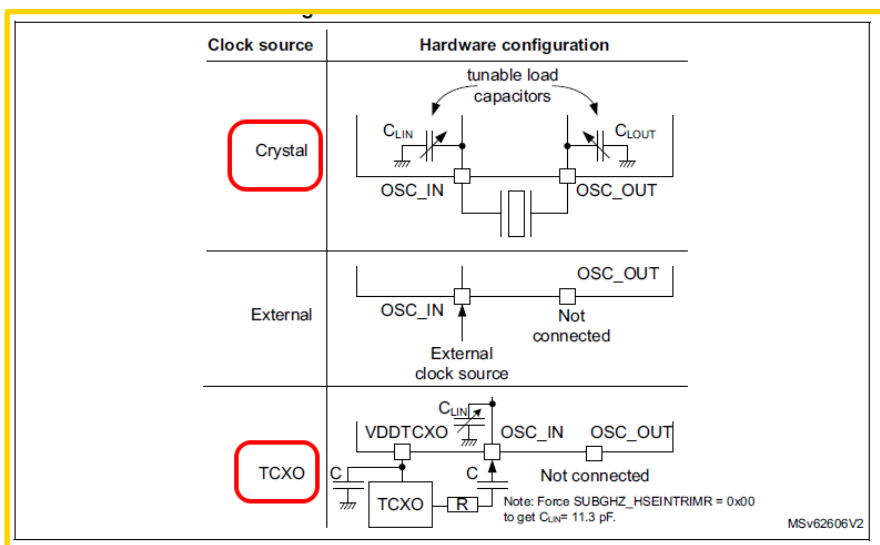
图十一, 修改后代码

修改代码后, 从 Standby mode 切换到 Rx 接收状态测试结果, 见图十二

```
COM22 - Tera Term VT
File Edit Setup Control Window Help
APP_VERSION= U1.0.0
0s011:SUBGRF_SetRx
0s012:SUBGRF_SetRx ready
2s011:OnRxTimeout
2s013:Master Tx start
2s187:OnTxDone
2s189:SUBGRF_SetStandby0
2s191:Rx start
2s191:SUBGRF_SetRx
2s191:SUBGRF_SetRx ready
2s191:Rx start ready
4s191:OnRxTimeout
4s193:Master Tx start
4s367:OnTxDone
4s369:SUBGRF_SetStandby0
4s371:Rx start
4s371:SUBGRF_SetRx
4s371:SUBGRF_SetRx ready
4s371:Rx start ready
6s371:OnRxTimeout
6s373:Master Tx start
6s546:OnTxDone
6s548:SUBGRF_SetStandby0
6s550:Rx start
```

图十二

如图十二所示, 从 Standby mode 切换到 Rx 接收状态耗时已经降为 2ms。改善明显。理论上如果, 将 32MHz 时钟源改为普通的 Crystal, 切换时间可以更低, 因为它不需要唤醒时间 (STM32WL Nucleo 板上默认使用的是 TCXO)。普通 Crystal 和 TCXO 硬件上接线区别, 见图十三,



图十三

如果采用普通的 Crystal，上面的软件设置也需要做修改，需将 SubGHz_Phy/Target/radio_board_if.h 中 RF_WAKEUP_TIME 的值设置为 0，如图十四，

```
/* Radio maximum wakeup time (in ms) */  
#define RF_WAKEUP_TIME 0U
```

图十四

这里需要注意的是采用普通的 Crystal 虽然可以获得更小的切换耗时，但如果 STM32WL 芯片 RF 功率输出配置为大功率输出，比如 22dBm 输出时，而且芯片封装是 BGA 的话，芯片发热会对 Crystal 有影响，从而影响 RF 工作频率的精度。而 TCXO 则在抗温漂上有优势，当然价格也更贵。所以如果使用普通 Crystal 需要在 layout 上做好隔热处理（参考 [AN5407 Optimized RF board layout for STM32WL Series \(version 2\)](#)）。客户具体产品的应用也需要在 LoRa Tx/Rx 切换耗时和 RF 工作频率精度以及成本上做一定的考量。

5. 小结

本篇笔记对如何解决 STM32WL LoRa 通信中从 Tx 发射状态切换到 Rx 接收状态耗时过长问题进行了分析。最后通过修改 TCXO 的唤醒时间 RF_WAKEUP_TIME 改善了从 Standby mode 切换到 Rx 接收状态耗时过长的问题。从而减少了 Tx/Rx 状态切换的耗时。如果需要实现更低的切换耗时，客户采用普通 Crystal 时，需注意发热对 RF 工作频率精度的影响，在 layout 上应做好相关隔热处理。

参考文献

文件编号	文件标题	版本号	发布日期
RM0461	STM32WLEx advanced Arm®-based 32-bit MCUs with sub-GHz radio solution	Rev 3	3-Nov-2020
AN5407	Optimized RF board layout for STM32WL Series	Rev 2	10-Jul-2020

文档中所用到的工具及版本

IAR 8.50.9

STM32CubeProgramer

版本历史

日期	版本	变更
2022年04月11日	1.0	首版发布

重要通知 - 请仔细阅读

意法半导体公司及其子公司 (“ST”) 保留随时对 ST 产品和 / 或本文档进行变更的权利，恕不另行通知。买方在订货之前应获取关于 ST 产品的最新信息。ST 产品的销售依照订单确认时的相关 ST 销售条款。

买方自行负责对 ST 产品的选择和使用，ST 概不承担与应用协助或买方产品设计相关的任何责任。

ST 不对任何知识产权进行任何明示或默示的授权或许可。

转售的 ST 产品如有不同于此处提供的信息的规定，将导致 ST 针对该产品授予的任何保证失效。

ST 和 ST 徽标是 ST 的商标。若需 ST 商标的更多信息，请参考 www.st.com/trademarks。所有其他产品或服务名称均为其各自所有者的财产。

本文档是 ST 中国本地团队的技术性文章，旨在交流与分享，并期望借此给予客户产品应用上足够的帮助或提醒。若文中内容存有局限或与 ST 官网资料不一致，请以实际应用验证结果和 ST 官网最新发布的内容为准。您拥有完全自主权是否采纳本文档（包括代码，电路图等信息，我们也不承担因使用或采纳本文档内容而导致的任何风险。

本文档中的信息取代本文档所有早期版本中提供的信息。