

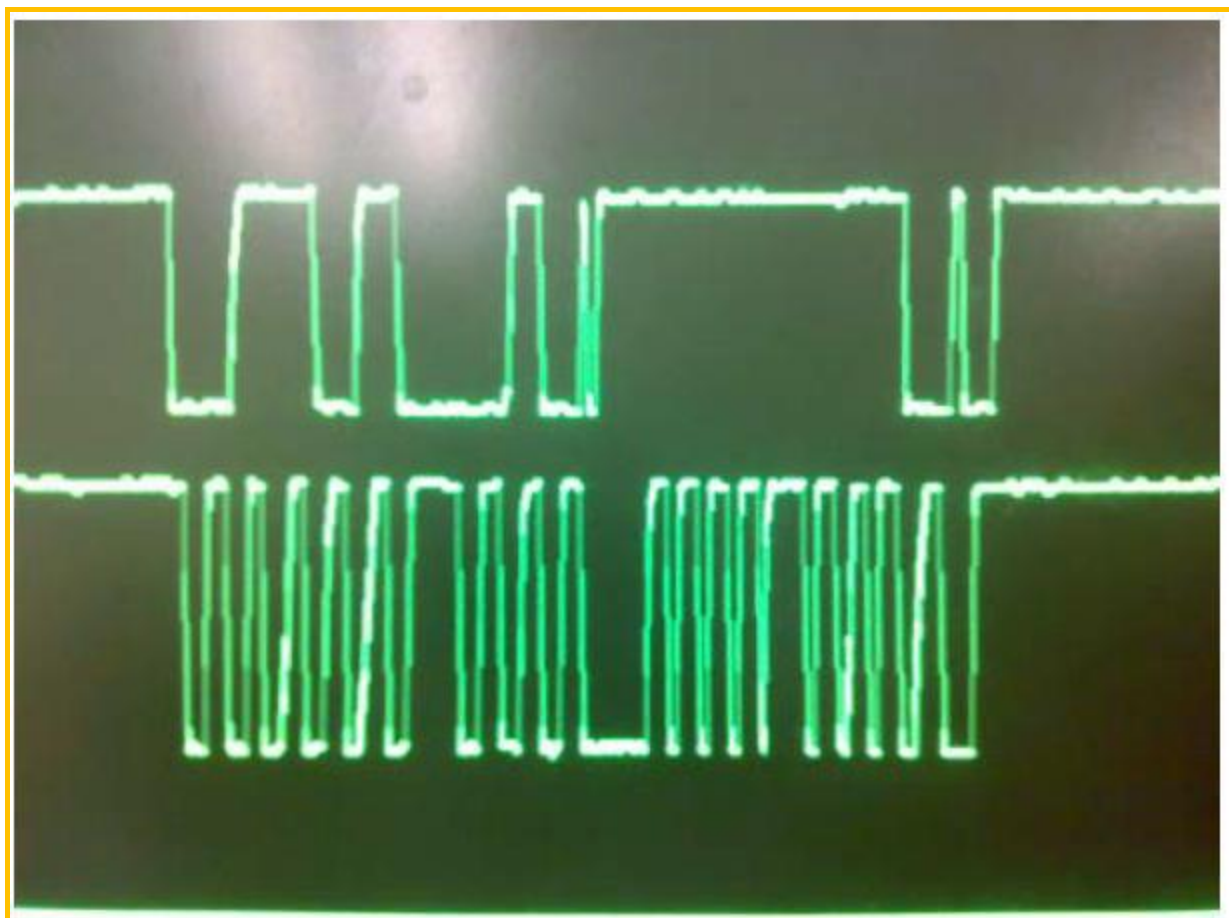
时钟延展导致 I²C 通信不可靠

问题：

该问题由某客户提出，发生在 STM32F103R8T6 器件上。据其工程师讲述：其产品中设计中，STM32 与一颗 MPEG 解码芯片通过 I2C 接口通信。其中，STM32 为 SLAVE 节点，而 MPEG 解码芯片为 MASTER 节点。在产品调试过程中，发现该通信不可靠。在系统运行一段时间后，该通信会出现故障而导致整个系统死机。使用示波器测量，发现这时 I2C 总线的 SCL 信号持续为低电平。

调研：

检查硬件设计，VDD、VDDA、VBAT、VSS、VSSA、NRST、BOOT0 等管脚相关的外部电路设计无异常。测量 I2C 通信数据帧结构，如图（一）所示，未见异常。重复长时间运行测试，故障重现，如其工程师所述。使用 IAR Embedded Workbench+Jlink 调试工具连接到 STM32 中正在运行的程序，将程序暂停后通过寄存器窗口修改 SCL 信号对应的 GPIO 寄存器，将 I/O 的模式切换到 GPIO 浮空输入模式。使用示波器测量 SCL 信号，发现此时 SCL 信号为高电平。再将 I/O 切换回 AF 开路输出模式，然后测量 SCL 信号，发现 SCL 又跳变到低电平。由此可以判定 SCL 信号上的低电平是由 STM32 驱动造成的。通过调试工具的观察窗口查看 I2C 接口的状态寄存器，发现 SR1 中的 RxNE 置 '1'，说明有数据在 DR 寄存器中未被读出。再查看 I2C 接口的控制寄存器，发现 CR1 寄存器中的 NO STRETCH 位为 '0'，说明 I2C 接允许时钟延展。于是，可以判定，此时 I2C 接口由于接收缓冲区满而对外送出的时钟延展信号，从而拉低了 SCL 信号。进一步通过其工程师了解到，MPEG 解码芯片的 I2C 接口是一个软件模拟的接口，不支持时钟延展功能。于是猜测，有可能是 MPEG 忽略的 STM32 送出的时钟延展信号，继续对外传送数据而造成冲突而导致数据丢失。如果其软件设计中存在某些缺陷，在通信数据丢失时进入死锁状态而不能退出，则会有类似的现象发生。进一步检查其软件设计，发现其对 I2C 接口接收到的数据的处理方式是边接收边处理，而且要待前一个数据处理完以后再去读取下一个数据，对某些数据的处理较为烦琐。修改其软件，在内存中建立一个 32 字节的循环缓冲区。通过中断的方式接收 I2C 接口收到的数据，保证数据传入后能够立即转移到循环缓冲区中。而数据的处理部分的程序分改从循环缓冲区取数据。重新进行测试，长时间观测，未见先前现象发生，从而印证了前面的猜测。



图（一）

结论：

由于 MASTER 节点不支持时钟延展，造成 I2C 信号冲突，从而有数据丢失。而其软件在某个数据丢失后，对后续的数据做出了错误的处理，最终进入了逻辑混乱状态。

处理：

加入循环缓冲区以避免数据丢失，加强其软件对数据的合法性的判断以避免造成错误处理，增加自恢复功能以增强系统的可靠性。

建议：

在 I2C 的规范中定义了时钟延展协议。通过这一协议，SLAVE 设备在没有条件接收或发送下一个数据时，可以拉低 SCL 信号，通知 MASTER 设备暂停数据的传输，直到 SLAVE 设备释放 SCL 信号。对于 STM32 的 I2C 接口来说，如果 CR1 寄存器中

的 NO STRETCH 位为 ‘0’ 则开启时钟延展协议，而该位为 ‘1’ 时关闭时钟延展协议。在开启了时钟延展协议的情况下，STM32 的 I2C 接口作为 SLAVE 设备接收数据时，如果 SR1 中的 RxNE 不为 ‘0’，也就是接收缓冲区不空，则会送出时钟延展信号，将 SCL 信号拉低。同样情况下，作为 SLAVE 设备发送数据时，如果发送缓冲区为空，即 SR1 中的 TxE 为 ‘1’ 时，也会送出时钟延展信号。在关闭了该协议的情况下，STM32 的 I2C 接口不会向外发送时钟延展信号。而此时，软件必须检测 SR1 寄存器中的 OVR 位，来判断是不发生了接收数据覆盖或重复发送问题。

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、更正、增强、修改和改进的权利，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。所有其他产品或服务名称均为其各自所有者的财产。

本文档中的信息取代本文档所有早期版本中提供的信息。