

Application Note

可穿戴设备应用中的 **SPI** 通信问题及智能手表应用中基于 **AFE4xxx** 的设计



Taemin Kim

摘要

可穿戴设备的发展趋势是低功耗、超小外形以及将各种功能集成到单个应用智能手表中。智能手表是最广为人知的应用，但智能手表的覆盖范围正在扩展，包括指环、手环、耳机等。可穿戴设计通常在小型器件内包含各种通信协议，包括 Bluetooth®、LTE、5G、SPI 和 I2C。因此，信号干扰可能在应用中的任何时间发生，有效管理这种干扰是一项关键的技能和专业知识。本应用报告演示了越来越小、越来越复杂的可穿戴设计中可能出现的通信问题（尤其是 SPI），以及如何识别和解决原因。

内容

1 简介.....2

2 SPI 通信问题和根本原因.....3

3 设计.....5

4 总结.....6

5 参考资料.....6

插图清单

图 1-1. 4 线制 SPI 基本原理图.....2

图 2-1. AFE4xxx 正常 SPI 通信.....3

图 2-2. 耦合噪声影响的测试原理图.....3

图 2-3. 外部射频耦合到 SCLK 路径时的测量结果.....4

图 2-4. 对输入缓冲器迟滞变化产生影响的测量结果.....4

图 3-1. 低通滤波器特性曲线.....5

图 3-2. SCLK 路径中的建议 LPF 原理图.....5

1 简介

AFE4xxx 系列是一个多功能信号采集系统，支持采集 PPG、EDA、ECG 和生物阻抗信号。PPG 信号链由 LED 电流驱动器和检测 PD 信号的接收器构成。具有右腿驱动 (RLD) 的 ECG 接收器可以从一对电极采集单导联 ECG 信号。具有集成激励和检测功能的阻抗测量信号链可用于 BIA、EDA 和阻抗谱分析等应用。各种信号链的输出由通用 ADC 进行数字化处理，并存储在可以使用 SPI 接口读出的 FIFO 中。

在日益紧凑的可穿戴设备中，每个信号的信号完整性 (SI) 成为关键因素。最近的可穿戴设备容易受到噪声的影响，因为除了内部有线通信之外，这些设备还包含各种通信模块，例如蓝牙、Wi-Fi 和 LTE。因此，尽可能地降低应用内可能出现的耦合和噪声水平以防止故障，这一点至关重要。本报告介绍了针对 SPI 通信问题的对策，以及在产品设计过程中必须考虑的用来减轻此类噪声影响的情况。

图 1-1 展示了基本 SPI 通信引脚和连接。SPI 4 线制通信由四条通信线路组成：SCLK、SDIN、SEN 和 SDOUT。此外，无需单独的上拉和下拉电阻，而在主器件和从器件之间需要直接连接。

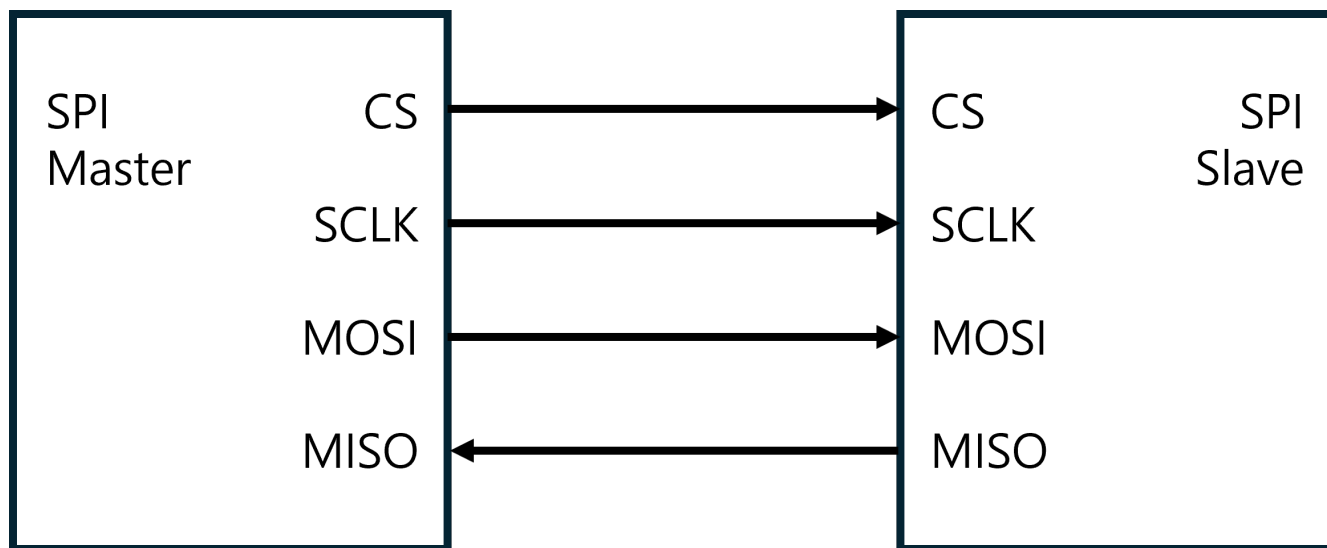


图 1-1. 4 线制 SPI 基本原理图

2 SPI 通信问题和根本原因

发生通信问题的原因有多种。原因可能是来自其他电路的噪声，也可能是因为其他信号耦合到现有信号，因而导致故障。本应用手册介绍了正常运行的 AFE4xxx 器件在开启射频信号时发生故障的情况。由于 EVB 旨在消除干扰并验证器件的最佳运行情况，很难识别复杂系统结构中可能出现的问题。因此，当现场出现问题时，快速准确地查明原因并为客户提供解决方案至关重要。

图 2-1 展示了正常的 SPI 通信。定期交换信号，表明任何引脚上都没有问题。但是，当 AFE4xxx 处于异常状态时，会表现出 BG 无法正常工作、不一致和未接收到数据等行为。

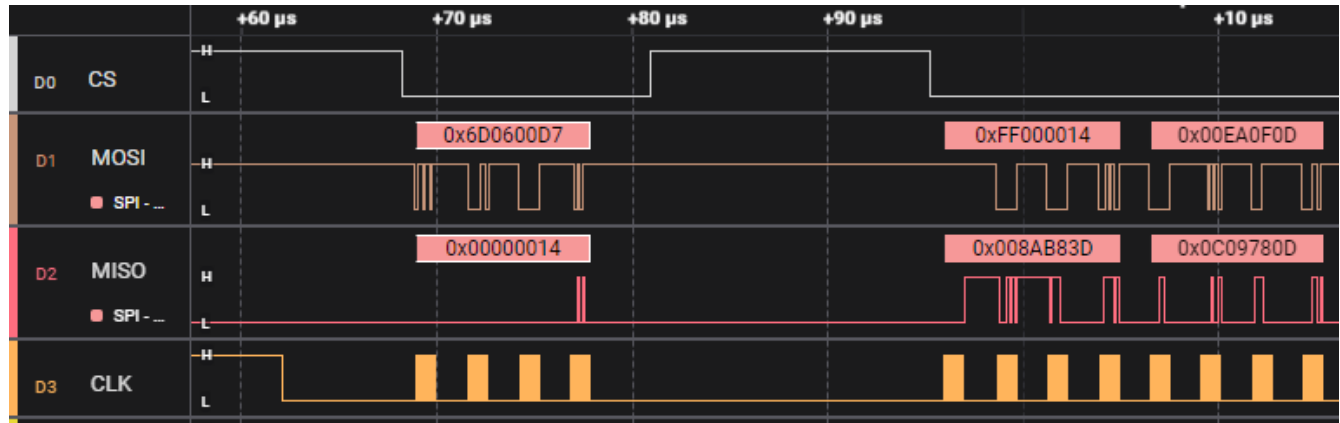


图 2-1. AFE4xxx 正常 SPI 通信

多项测试证实射频信号会影响 AFE4xxx SPI 通信，尝试了各种设计来更大幅度地减少重新设计工作量并解决问题。由于天线效应，外部电磁噪声 (EMI) 在高频频带上往往更加严重。因此，与之前的设置相比，用户尝试降低 SPI 速度 (频率)，但出现了相同的问题。

因此，直接对 SCLK 线路施加射频信号并验证器件运行情况时，获得的结果与现场观察到的结果类似。这表明耦合到 SCLK 线路的射频信号影响了运行决策。图 2-2 展示了使用信号发生器将射频信号施加到 SCLK 线路的耦合噪声影响的测试原理图，图 2-3 是上升沿的放大图。由于上升沿存在毛刺 (噪声)，信号不会在单次低电平到高电平转换中上升，而是在中点处增加一个周期后上升。这种引入 SCLK 线路的噪声导致了器件发生故障。

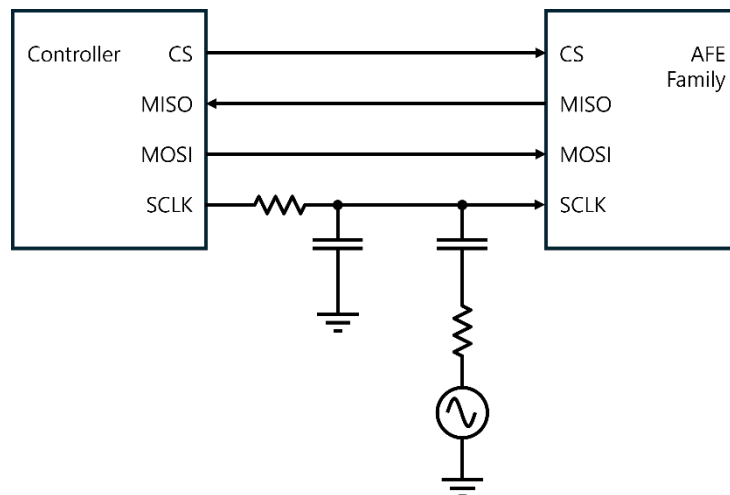


图 2-2. 耦合噪声影响的测试原理图

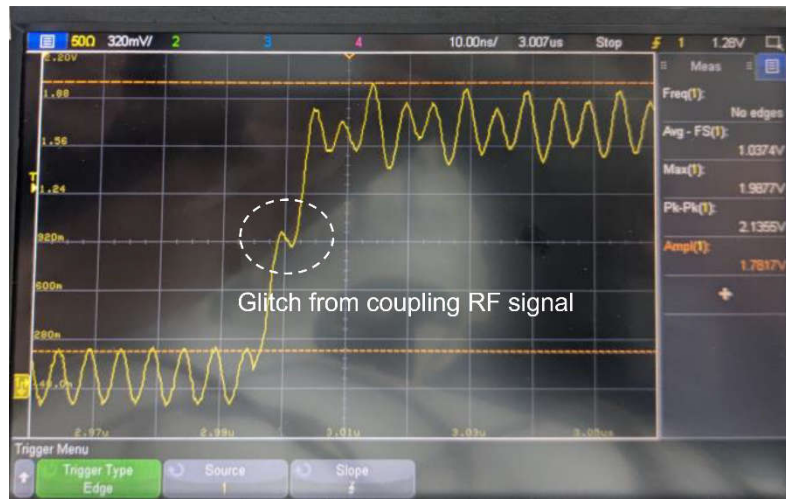


图 2-3. 外部射频耦合到 SCLK 路径时的测量结果

图 2-4 显示了发生在上升沿上的毛刺的影响。VIH 和 VIL 电平的毛刺会导致 AFE 的内部时钟发生故障。虽然无噪声信号必须随着信号上升而均匀上升，但毛刺会导致在上升沿从高电平下降到低电平。

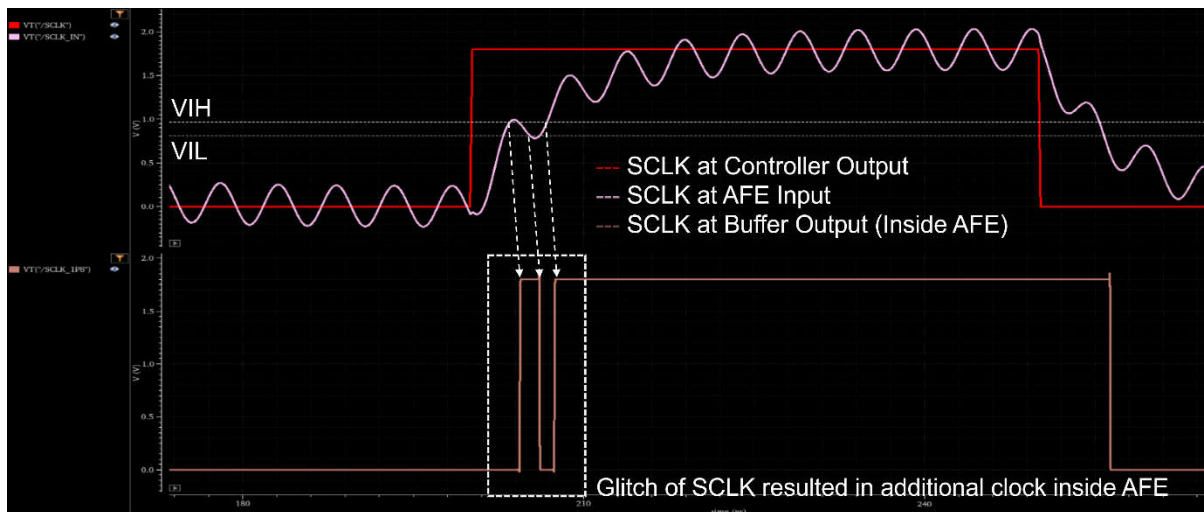


图 2-4. 对输入缓冲器迟滞变化产生影响的测量结果

3 设计

一种现场适用的设计是向 SCLK 线路添加滤波器以消除噪声。由于 SPI 通信本身速度并不快，因此额外的滤波器因延迟而影响通信的可能性非常低。需要使用低通滤波器来消除高频。考虑到工作频率，截止频率应当约为工作频率和裕度的三倍。图 3-1 展示了 LPF 基本特性曲线。

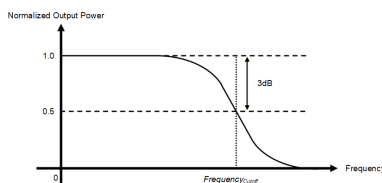
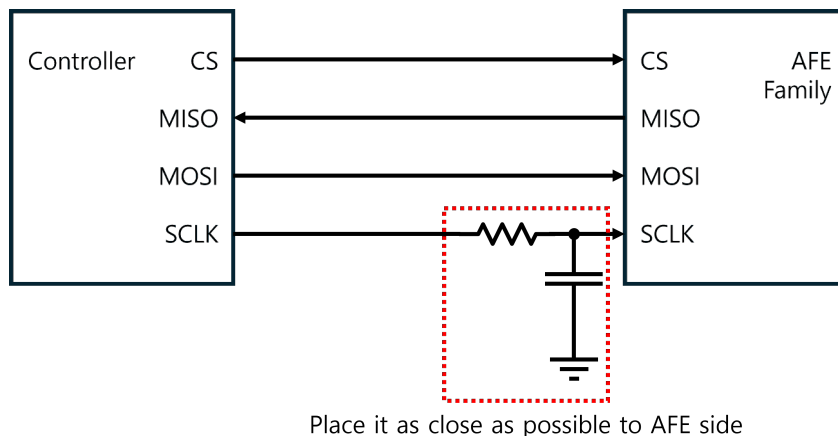


图 3-1. 低通滤波器特性曲线

低通滤波器 (LPF) 截止频率为 F_c 。 F_c 可表示为下面的公式：

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (1)$$

此外，滤波器必须尽可能靠近从器件、AFE4xxxx 和引脚放置，以消除时钟噪声并保持器件正常运行。将滤波器放置在通信线路的中间或主侧会导致将噪声重新引入滤波后的信号中。图 3-2 显示了如何放置滤波器。



Place it as close as possible to AFE side

图 3-2. SCLK 路径中的建议 LPF 原理图

另一种方法是在设计下一个版本的器件时增加 SCLK 缓冲器的迟滞裕度。可穿戴设备的发展趋势是尽可能地降低外部噪声，从而实现功耗、产品尺寸和价格竞争力。因此，对于可穿戴设备以及所有致力于 PE 的设备，都必须考虑改善下一代产品开发中缓冲器的迟滞，这种性能可以提高产品的竞争力。

4 总结

本应用手册针对智能器件中由噪声引起的 SPI 通信错误提出了测试和设计建议。在包含多种通信的应用中发生 SPI 通信错误时，首先要检查时钟是否正确输入。耦合到时钟信号的噪声可能会导致 AFE4xxx 芯片本身发生故障。有两种方法可以去除引入时钟的噪声信号：使用低通滤波器 (LPF) 增加产品迟滞的缓冲余量。但是，当空间和时间受限时，将 LPF 尽可能靠近 AFE4xxx (从器件) 放置可以解决噪声引起的问题。

5 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [AFE4432 适用于光学生物传感应用的超小型集成式 AFE](#), 数据表。
2. 德州仪器 (TI), [AFE4432 EVM 用户指南](#), 用户指南。
3. 德州仪器 (TI), [INA901-SP 电流检测放大器的单粒子锁定 \(SEL\) 测试报告](#), 辐射报告。
4. 德州仪器 (TI), [有源低通滤波器设计](#), 应用报告。

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月