

基于 CC2755 的蓝牙信道探测技术在智能门锁无钥匙进入系统中的应用



Albin Zhang
Winnie Lee

Connectivity solution

摘要

本应用笔记介绍了如何基于 TI SimpleLink™ CC2755 系列无线 MCU，利用蓝牙 6.0 核心规范中的信道探测 (Channel Sounding) 功能，实现智能门锁的高精度无钥匙进入系统。信道探测技术通过基于相位的测距 (PBR) 和往返时间测量 (RTT) 相结合的方式，可实现厘米级的距离测量精度，相较传统的 RSSI 测距方案在精度、稳定性和安全性方面均有质的飞跃。相比其他的开锁方式，可以大幅改善用户体验，实现无感进入。

本文阐述了信道探测技术在智能门锁中的应用原理，实现方法，测试结果等关键点。并结合 TI 的相关产品，为用户提供系统级解决方案及设计指导。

内容

1 引言	2
2 CC2755 简介	3
3 TI 门锁方案的演示	4
4 信道探测技术概述	5
4.1 基本原理	5
4.2 测距方法	5
4.3 精度与可靠性	6
5 系统总体设计	7
5.1 系统总体架构	7
6 基于 CC2755 的测距实现	10
6.1 无钥匙进入逻辑	10
6.2 射频硬件设计	10
6.3 硬件参考设计	11
6.4 单天线和多天线	11
6.5 测试结果	13
6.6 功耗仿真	16
7 总结	17
8 参考文献	18

插图清单

图 2-1. CC2755 功能框图	3
图 3-1. 基于 CC2755 的智能锁系统	4
图 4-1. 信道检测原理示意图	5
图 4-2. PBR 原理示意图	5
图 4-3. PBR 测量流程	6
图 4-4. RTT 示意图	6
图 5-1. 支持蓝牙信道检测电子锁系统实例框图	7
图 6-1. CC2755 参考双天线参考板	11
图 6-2. 基于相位测量 (PBR) 的融合后处理流程	14
图 6-3. 测试环境实景	15
图 6-4. 实际 60cm 测试距离	15

图 6-5. 实际 100cm 测试距离.....	16
图 6-6. 实际 200cm 测试距离.....	16

表格清单

表 5-1. 电子锁系统中降压转换器推荐产品.....	8
表 5-2. 电子锁系统中马达驱动推荐产品.....	9

1 引言

在智能门锁行业的发展历程中, "更安全、更可靠、更无感" 的开锁体验始终是技术演进的核心目标。传统蓝牙智能门锁的无感开锁功能通常以接收信号强度指示 (RSSI) 为距离判据, 借助路径损耗计算触发解锁逻辑。然而, RSSI 信号易受隔墙、人体遮挡和金属反射等因素影响而剧烈波动, 精度通常在数米量级, 难以准确判断用户是否真正靠近门锁位置, 且存在中继攻击等安全风险。

蓝牙 6.0 规范中引入的信道探测 (Channel Sounding) 功能从根本上解决了这一问题。该功能不再依赖信号强度, 而是通过对无线信号相位变化和往返时间的精确测量来计算设备之间的物理距离, 测距精度可达厘米级, 并内置了抗中继攻击等安全机制。

TI SimpleLink™ CC2755 系列器件是业界首款通过蓝牙信道探测认证并量产出货的无线 MCU 产品系列, 支持 Bluetooth® 6.0 规范, 内部集成了专用于信道探测后处理的算法处理单元 (APU) 和神经元处理器单元 (NPU-CDE), 可运行 MUSIC 和网络模型等高分辨率测距算法来解决 LOS (Line of Sight) 和 NLOS (non- Line of Sight) 等复杂应用场景的后处理。本文以智能门锁无钥匙进入应用为场景, 介绍基于 CC2755 的系统实现方案。

2 CC2755 简介

CC2755 系列器件是 SimpleLink™ MCU 平台的重要组成部分，其系列根据发射功率不同分为 R/P 版本，包含更多的封装和存储单元版本。本文基于 CC2755R10 进行阐述，如图 2-1 所示。详情可见参考文档[1]。

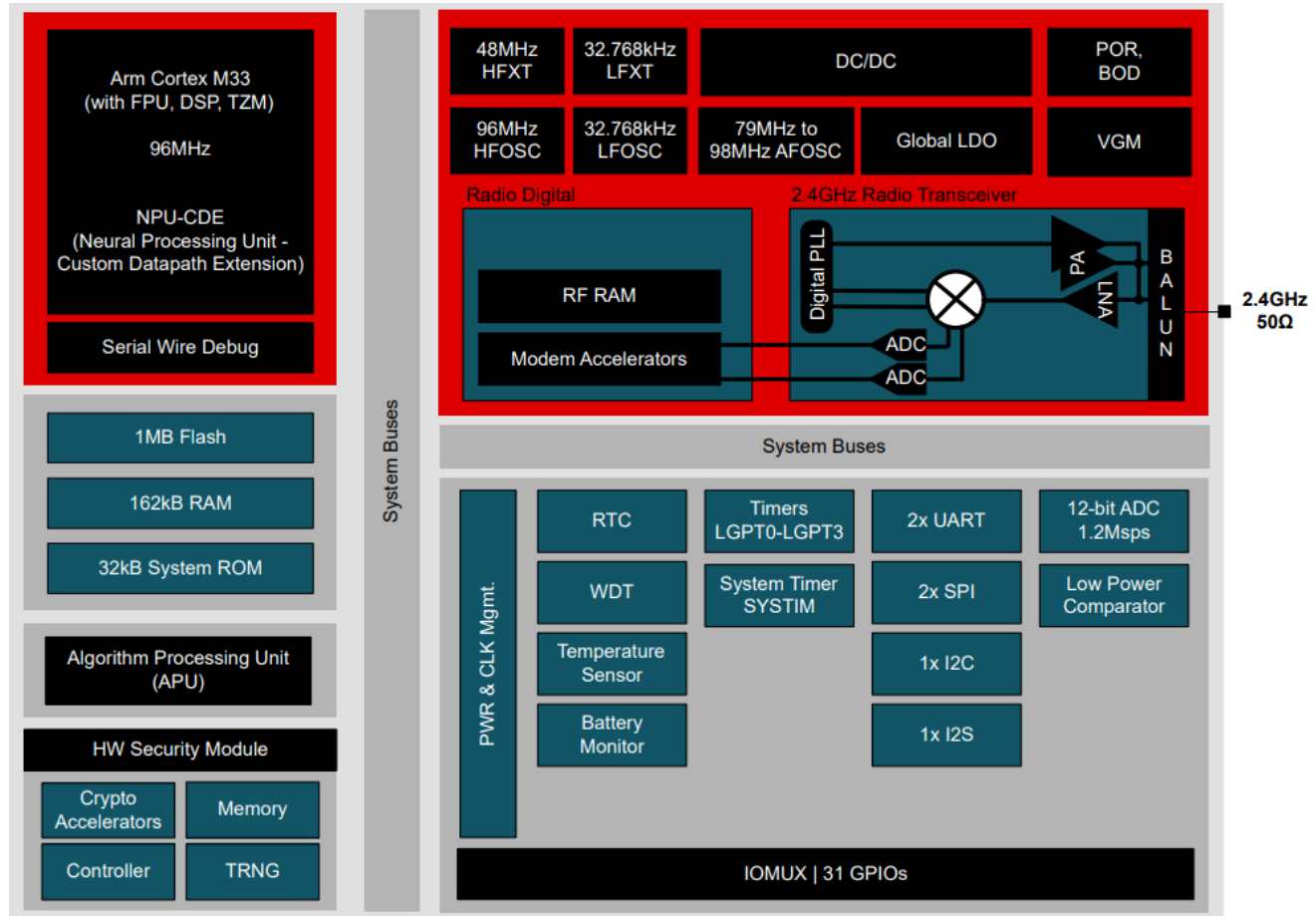


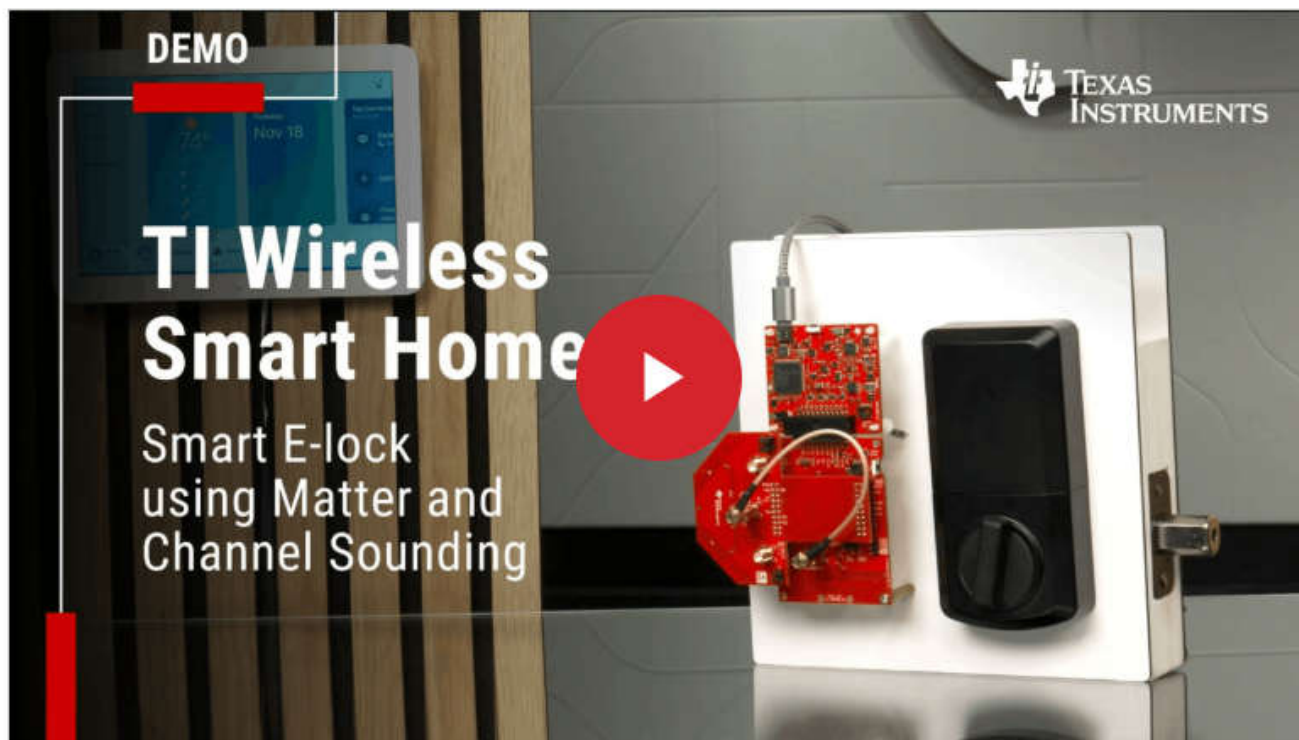
图 2-1. CC2755 功能框图

其核心特性如下。特别是配备了支持 NPU-CDE 的处理器内核以及算法处理单元，使信道探测的后处理时间大大加速，更进一步降低处理功耗。同时，也可以支持 Edge AI 的运算，详情参考文档 [2]。

- 处理核心：ARM® Cortex®-M33 处理器，支持 TrustZone®-M、FPU 和用于机器学习加速的 NPU-CDE。
- 算法处理单元（APU）：专用数学加速器（96 MHz），支持高效的向量和矩阵运算，作为信道探测进行后处理，运行 IFFT 及 MUSIC 等高分辨率测距算法。
- 存储资源：CC2755R10 拥有 1 MB 的系统可编程 Flash，162 KB SRAM，32 KB 系统 ROM（内含安全启动根信任和串行引导加载程序）。
- 射频性能：集成 BALUN 和 RF 开关，接收灵敏度在 1 Mbps 模式下为 -97 dBm，125 kbps Coded PHY 模式下为 -103.5 dBm。R 版本输出功率最高 +10 dBm，P 版本输出功率最高 +20 dBm。
- 低功耗：RX 电流 6.1 mA，TX 电流（0 dBm）7.7 mA，待机模式 0.9 μA（RTC 开启，全 SRAM 保持），关断模式仅 160 nA。
- 安全性：集成 HSM 硬件安全模块，支持 AES-256、ECC-521、RSA-3072、SHA-512 加速，真随机数发生器等。
- 外设：23 个 GPIO、12 位 ADC、低功耗比较器、2×UART、2×SPI、1×I2C、1×I2S 等。

3 TI 门锁方案的演示

在 TI 于 Embedded World 2025 展示的基于 [CC2755](#) 的智能锁演示系统中，信道探测技术实现了 sub-50 cm 的测距精度，系统在 30 至 40 米的范围内保持稳定可靠运行。采用多天线设计的方案可在 5 米内实现约 0.3 米的精度，在 5 米以上实现约 0.5 米的精度。同时，也演示了 Matter over Thread 的方案，以及利用 Edge AI，实现关键词识别的技术。本文重点讨论信道探测技术。Matter 和 Edge AI，请查阅 TI 其他相关文档。



Smart e-Lock with Matter over Thread and Channel Sounding support

图 3-1. 基于 CC2755 的智能锁系统

4 信道探测技术概述

4.1 基本原理

信道探测是一种在 BLE 连接的两台设备之间估算距离的方法。参与测距的两台设备分别称为 **Initiator** 启动器和 **Reflector** 反射器。两台设备通过交换同步信息、测距包和单音信号来完成距离测量。该过程在蓝牙 6.0 规范中定义了多个步骤：

- Mode 0 用于交换同步信息
- Mode 1 用于 RTT 包交换以增强安全性
- Mode 2 用于交换未调制单音以进行 PBR 测量
- Mode 3 为可选步骤，结合了 RTT 和 PBR 操作

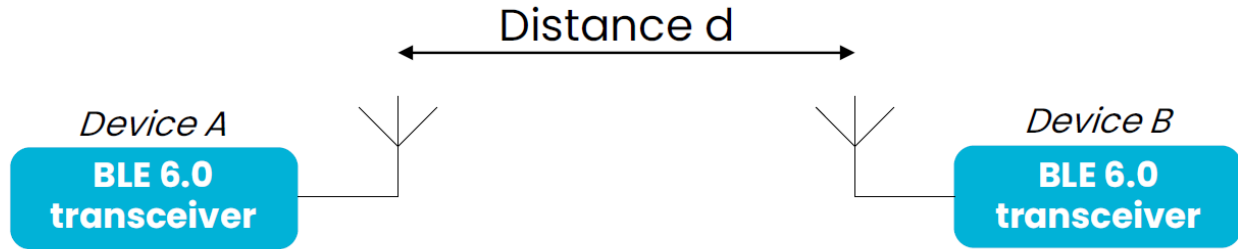


图 4-1. 信道检测原理示意图

4.2 测距方法

信道探测使用两种互补的测距方法来确定两台设备间的距离。

基于相位的测距（PBR），启动器发送具有特定频率和幅度信息的信号，反射器测量接收信号的相位并返回响应，通过比较两台设备信号的相位差来推算相对距离（如图 4-2）。PBR 可提供极高的测距精度，近距离下精度可达 ± 10 cm。

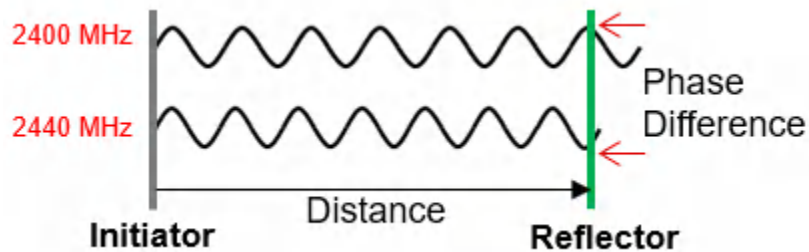


图 4-2. PBR 原理示意图

PBR 的测量流程如图 4-3 所示：

1. 启动器在 F1 处传输未调制单音信号。
2. 反射器对传入提示音 F1 执行相位测量。
3. 反射器在 F1 处传输未调制的单音。
4. 启动器执行呼入提示音的相位测量。
5. 反射器将相位测量传输到启动器，以减去启动器/反射器本地振荡器的相对相位。

以上步骤(1)-(4)通过多个频率单音频率执行(通常为 72 步)。

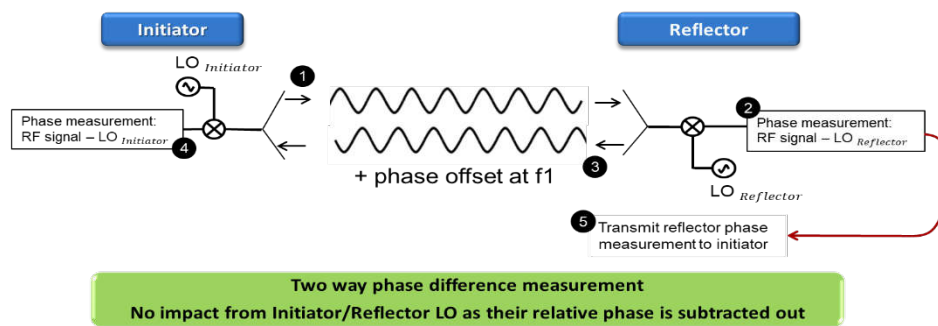
Phase measurement at frequency f_1 

图 4-3. PBR 测量流程

往返时间测量 (RTT)，通过测量信号在启动器和反射器之间往返的飞行时间 (ToF) 来估算距离。两台设备分别记录信号的到达时间 (ToA) 和离开时间 (ToD)，分析两者的差值即可获得距离数据。

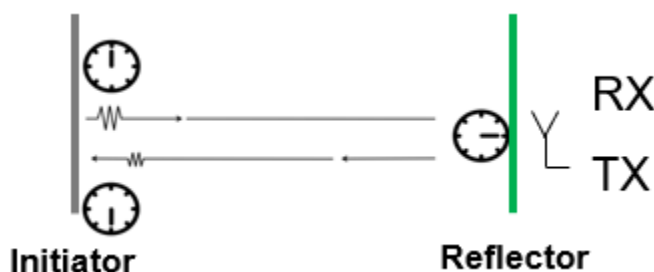


图 4-4. RTT 示意图

PBR 与 RTT 的协同工作具有多重优势：RTT 解决了相位测量中的距离模糊问题，扩展了有效测距范围；同时 RTT 所附带的时间戳机制可有效防范中继攻击；PBR 和 RTT 的交叉验证进一步增强了系统的抗攻击能力。

对于门锁应用来说，基础流程和角色如下：

- **连接建立与能力协商**：门锁端 (Initiator) 与钥匙端 (Reflector) 建立 BLE 连接，交换信道探测能力信息 (包括支持的天线数量、天线切换模式等)。
- **同步 (Mode 0)**：交换同步信息，确保双方时序对齐。
- **RTT 测量 (Mode 1)**：进行 RTT 包交换，获取往返时间数据，同时增强安全性。
- **PBR 测量 (Mode 2)**：在多个信道上交换未调制单音，获取相位差信息。
- **利用 NPU-CDE 和 APU 后处理**：CC2755 内部的 APU 对采集的 IQ 数据进行处理，运行 IFFT 和 MUSIC 等高分辨率算法，计算出精确距离。
- **距离输出**：APU 将计算得到的距离值传递给应用层做决策。

4.3 精度与可靠性

CC2755 的信道探测技术已广泛应用于汽车无钥匙进入启动 (PEPS) 系统。实现了 sub-50 cm 的测距精度，系统在 30 至 40 米的范围内保持稳定可靠运行。采用双天线设计的方案可在 5 米内实现约 0.3 米的精度，在 5 米以上实现约 0.5 米的精度。

信道探测支持最多 4 条天线路径和 8 种天线组合，可在复杂环境中有效减轻多径反射对测距精度的影响，相较于 RSSI 方案具有显著的稳定性和可靠性优势。

基于智能门锁的应用，本文还提供了详细的近距离两米之内精度的测试报告。参见章节 [测试结果](#)。

5 系统总体设计

5.1 系统总体架构

电子智能锁（电子锁）通常由以下关键功能模块构成：

- 人机界面（HMI）：HMI 可为用户提供了一种与系统交互或者查看电子锁响应的方法。HMI 可能包括背光、LED、屏幕、扬声器、键盘，甚至麦克风。一些电子锁设计在与系统其余部分物理隔离的 PCB 上实现 HMI。HMI 可实现低功耗模式（如待机时仅保留少量 LED 或蜂鸣器），一些电子锁设计在用户接近时（通过电容触摸或传感器唤醒）激活 HMI。同时无线连接支持远程设备（如智能手机或者平板电脑）上操作键盘等部分 HMI 功能。
- 无线连接及主机控制器：无线连接（如低功耗蓝牙、Wi-Fi、Sub-1GHz 或 RFID）在所种增加里一个额外的数据接口，此接口可用于各种用途，包括用户无线身份验证、远程控制和监控、软件更新的无线传输或与物联网传感器的通信。在某些情况下，通过增加无线接口，就可以通过远程设备（如智能手机或平板电脑）操作部分 HMI 功能。主机控制器负责处理来自用户的传感器的输入，它还通过驱动物理锁定机制或者通过 HMI 提供反馈来生成响应。使用 CC2755 无线 MCU，可以将主机控制器和低功耗蓝牙集成到一个芯片中
- 电机子系统：电机子系统包括电机驱动和用于驱动锁定机制的电机。电子锁通常使用有刷直流电机或步进电机来运行锁定机制。可以使用低压单 H 桥或者双 H 桥电机驱动器。
- 传感器：可以在电子锁中使用各种传感器，以检测锁和门的状态（例如使用加速度计或者惯性测量单元（IMU）来检测门的开关状态）或用户是否在场或者靠近（例如，使用被动红外（PIR）传感器或毫米波雷达来进行接近检测）。
- 电源管理：主要有三种电源拓扑可用于此类智能锁应用——低压降稳压器（LDO）、降压 DC-DC 转换器和升压 DC-DC 转换器。LDO 和降压转换器解决方案与时间不相关，这意味着无论一天之内发生了多少个锁定和解锁时间，这两种拓扑都使用相同的能量。LDO 和降压转换器会使电压降低以生成电压较低的电源轨来运行 MCU，而电压较高的时间则由电压较高的电池供电。升压转换器解决方案与事件相关，因为每个锁定和解锁事件必须将电压从 3V 升高到 5V 以保证电机和 LED 运行。本设计选择了降压转换器解决方案，因为 LDO 具有接地泄露电流，而降压转换器具有零接地泄露电流，因此整体效率更高。

图 5-1 显示了支持蓝牙信道探测的电子锁系统的典型框图。

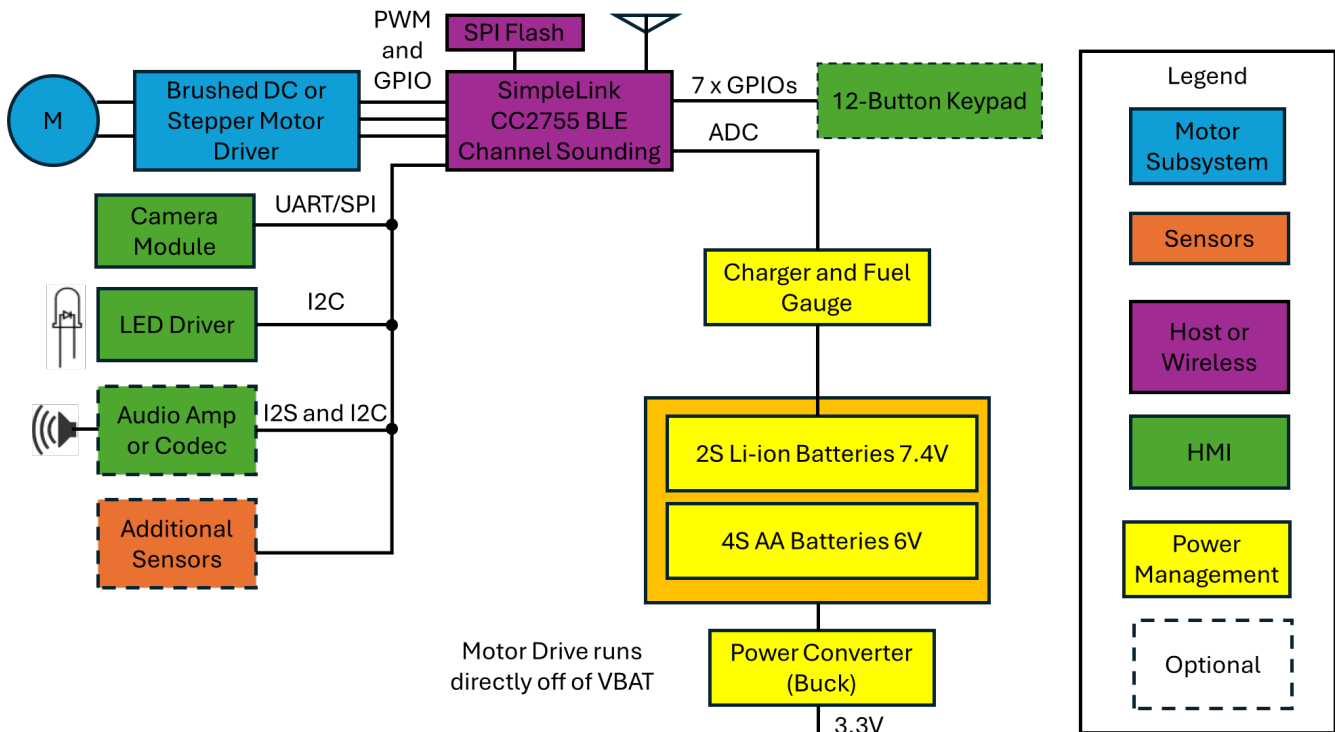


图 5-1. 支持蓝牙信道检测电子锁系统实例框图

5.1.1 电源设计指导

电源管理模块必须由用户安装的电池供电。电池类型、数量和电压的选择与系统的电源架构和电源管理选择密切相关：

- AA 尺寸的碱性电池：大多数电子锁使用 4 节或 8 节电池供电，单节电压 1.5V，整体续航约 6 - 12 个月。因其在消费者中的广泛可用性和低成本而被广泛用于智能锁。
- 锂电池：高端型号配备可充电锂电池，支持 USB-C 充电，寿命 2 - 3 年。

5.1.1.1 线性稳压器架构

以 AA 电池四节串联,一节并联方式连接为例，产生 6V 电源电压为电机供电。因此，只需一个简单的电机驱动器即可打开或关闭电机，而无需任何额外的电源管理。因此，电机子系统以接近 100%的效率运行。LDO 将较高的电池电压降至较低的电压，比如使用一个 LDO 将 6V 电池电压转换为无线微控制器所需的 3.3V。任何将 6V 转换为 3.3V 的 LDO，其效率最高为 55%，而在待机模式下，由于 LDO 的静态电流较高，其效率会低得多。例如，TPS76633 适合将四节 AA 电池转换为 3.3V。该器件在较高的负载下可实现 55%的效率，但在 1.2 μ A 的待机负载下，由于其 55 μ A 的静态电流，效率仅为 1.2%。极低的效率导致智能电子锁在待机时功耗相对较高，从而缩短了电池寿命。

5.1.1.2 降压转换器架构

采用与 LDO 系统相同的电源架构，但用降压转换器取代 LDO，可显著提高效率。在无线微控制器的满负载下，降压转换器（如 TPS62745）的效率为 90%。电机子系统仍然接近 100%的效率，因为它直接连接到电池组。

标准的降压转换器具有相对较大的静态电流，而高静态电流存在会使得其像在 LDO 中那样，在待机模式下急剧降低效率。然而，本示例中使用的超低功耗降压转换器，其具有专门为物联网应用设计的超低静态电流，这些应用具有较高的峰值电流和较长的系统待机时间。在输出 3.3V 电压时，超低静态电流使得在典型的待机模式负载电流下效率仍超过 67%。

表 5-1 列举了推荐使用在电子锁系统的降压转换器产品。

表 5-1. 电子锁系统中降压转换器推荐产品

高性能/ 高性价比/新 产品	料号	简要描述	封装 尺寸	关键规格	定位（对比竞品及适配性）	支持资料
高性能	TPS62745	10V、300mA 降压	WSO8	超低静态电流 400nA； 效率高达 90%；可用 3.3 μ H 或 4.7 μ H 小电 感	超低 I _q 延长电池寿命；易用 小电感；高效率；	TIDA-00757 TPS62745EVM-622
高性价比 /新产品	TPS562202 TPS563202	17V、2A/3A 同步降压	SOT563	成本效益高；小封装； DCA2P 控制拓扑	小尺寸易用；瞬态响应快；待 机电流低；	TPS562202EVM TPS563202EVM TIDA-010231
高性能 /新产品	TPS62901 TPS62902 TPS62903	17V、 1A/2A/3A 同步 降压	QFN	低 I _q （4 μ A）；小封 装；单层布线；高精 度、瞬态响应快	低 I _q 延长电池寿命；节省 PCB 面积、支持小尺寸设 计；支持高性能设计；	TPS62901EVM-069 TPS62902EVM-069 TPS62903EVM-069 TIDA-050052
高性价比 /新产品	TPS562211 TPS563211	17V、2A/3A 同步降压	SOT583	成本效益高；小封装； 可选 PG/SS、 FCCM/ECO	客户设计更灵活、认证工作量 少；外部元件最少、优化板空 间；固定频率下瞬态响应快；	TPS562211EVM TPS563211EVM
高性能 /新产品	TPS629203 TPS629206 TPS629210	17V、 0.3/0.6/1A 同 步降压	SOT583	低 I _q （<4 μ A）；小引 脚封装；高精度、瞬态 响应快	低 I _q 延长电池寿命；节省 PCB 面积、支持小尺寸设 计；支持高性能设计；	TPS629203EVM PMP23331 TPS629206EVM TPS629210EVM

5.1.2 马达驱动设计指导

- 低功耗智能锁（几乎无无线连接、基础锁具）：需小尺寸、简单设计；电机电流斩波/反馈通常不使用电流调节——有刷直流电机无浪涌电流限制；可通过霍尔或磁传感器确定锁位置。

- 高端智能锁：需小尺寸、保护功能及位置/速度控制；采用电流调节（低端检测电阻）——限制电机启动时的浪涌电流，保护电池系统、延长续航。

表 5-2 列举了推荐使用在电子锁系统的马达驱动产品。

表 5-2. 电子锁系统中马达驱动推荐产品

高性能 /高性价比 /新产品	料号	简要描述	封装尺寸	关键规格	定位（对比竞品及 适配性）	支持资料
高性价比 /新产品	DRV8210/P DRV8212/P	12V、1.76A H 桥驱动器； 12V、4A H 桥驱动器；	SOT563 WSO	高集成度、简单设计； 小尺寸； DRV8210P/DRV8212P 与 DRV8837C / DRV8837 引脚兼容	基础锁具、无无线 连接；小尺寸+低 成本，适配入门级 智能锁；	DRV8210EVM TIDA-010266 DRV8212EVM DRV82xxEVM Hardware Files
高性能	DRV8847 DRV8832 DRV8833C	18V、2A H 桥驱动器； 7V、1A H 桥驱动器； 10.8V、1A H 桥驱动器；	HTSSOP, TSSOP, WQFN; HVSSOP, VSON; HTSSOP, WQFN;	具有电流调节和独立半 桥控制； 具有电压调节（恒定转 速控制）；	高端锁具；需精准 控制；浪涌限制提 升电池寿命；	DRV8847EVM TIDA-010072 DRV8832EVM Board Files: DRV8830 EVM and DRV8832 EVM
高性能	DRV8876	40V、3.5A H 桥驱动器；	HTSSOP, VQFN;	集成电流感应和电流感 应反馈	小体积、高功率、 无传感检测；适配 紧凑设计的高端锁 具；	DRV8876EVM slvae68b TIDA-010073
高性能 /新产品	DRV8213 DRV8214	11V、4A 有刷直流驱动 器； 11V、4A H 桥驱动器	WSO, WQFN; WQFN	集成电流检测、电流调 节和失速检测； 纹波计数和 I2C 接口；	小体积、无传感 检测；适配紧凑设 计的高端锁具；	DRV8213EVM DRV8214EVM

6 基于 CC2755 的测距实现

6.1 无钥匙进入逻辑

实现手机与门锁间的无感测距开锁，核心是利用信道探测（Channel Sounding）获得厘米级距离，再结合安全逻辑防止误开或中继攻击。以下是一套可行的逻辑方案：

6.1.1 基础配置与校准

- **硬件要求：**手机（或其他实体钥匙设备）与门锁均需支持蓝牙 CS，并完成配对绑定。

备注

注：其中手机端需要和手机设备商有深度合作才可后台运行。否则，需要开启响应 APP 激活流程。

- **环境校准：**首次使用时，引导用户在门外 0.5m、1m、2m 等典型位置停留片刻，让门锁记录该环境下的 RSSI 与信道冲击响应特征，建立距离标定映射。

6.1.2 实时测距流程

- **触发唤醒：**门锁内置低功耗加速度计或接近传感器，检测到门前有人停留 ≥ 1 秒，即开启 CS 测距请求。
- **双向测距：**手机后台响应请求，双方执行多次信道探测测量。
- **防中继/重放：**每次测距数据包附带滚动时间戳和会话随机数，门锁验证新鲜性，避免通过蓝牙放大器远程劫持。

6.1.3 无感开锁决策逻辑

三级距离阈值（以门锁为原点）：

- 远区（ $>2.5\text{m}$ ）：不动作，保持休眠。
- 近区（ $1.2\text{m} - 2.5\text{m}$ ）：标记“接近中”。
- 动作区（ $<1.2\text{m}$ ）：启动连续距离序列分析。

6.1.3.1 意图判断

并非只要距离 $<1.2\text{m}$ 就开锁，必须同时满足：

- 持续向门靠近：最近 3 个测距值严格递减（距离变短），排除在门前徘徊或路过。
- 停留验证：进入动作区后，距离波动 $<0.15\text{m}$ 且持续时间 ≥ 0.8 秒（表明用户主动停步准备开门）。
- 手机姿态一致：手机陀螺仪显示接近水平且加速度稳定（排除拿在手中甩动或放在包里颠簸）。
- 安全锁定：若连续 3 次进入动作区但未开锁（用户仅路过），则临时屏蔽测距请求 2 分钟。

6.1.4 开锁执行与反馈

- 门锁验证手机仍在动作区内，执行开锁，并记录本次成功距离（用于自适应微调阈值）。
- 手机端无感（无弹窗），但门锁可发出柔和的成功提示音。
- 防重复触发：开锁后 5 秒内忽略所有测距结果，避免反复开关锁。

6.1.5 异常处理

- 电量不足：门锁低电量时禁用无感开锁，需手动验证。
- 多手机干扰：若同时检测到两台已绑定手机，优先以距离更近且符合接近趋势的手机为准。
- 测距失败：连续 10 次探测无效（信号遮挡），自动回退到蓝牙 RSSI 粗测或要求手动触摸唤醒。

此逻辑在确保便捷的同时，通过“距离阈值+趋势判断+短时停留”三重条件，可有效防止路过、邻居误开等风险。实际部署时还需根据门锁安装位置（金属门衰减）微调距离阈值。

6.2 射频硬件设计

6.2.1 钥匙端方案选择

钥匙端可根据应用场景灵活选择方案：

- **智能手机方案：**利用用户随身携带的支持 BLE 6.0 信道探测的智能手机作为钥匙端。当前主流智能手机厂商正逐步在新款手机中集成 BLE 6.0 信道探测功能，通过配套 App 即可实现无钥匙进入。

- 专用钥匙方案：采用 CC2755 或 CC2340 构建专用钥匙设备（如钥匙扣、手环等形态），可作为备用钥匙或提供给不具备 BLE 6.0 手机的用户使用。

6.2.2 门锁端方案选择

可根据系统的功能决定是否采用双芯片（BLE+MCU）或利用 CC2755 作为主控的方案。

6.3 硬件参考设计

硬件的设计指导文档：[CC234x and CC27xx Hardware Configuration and PCB Design Considerations \(Rev. A\)](#)以及 CC27xx 系统设计-原理图及布板指南

本文不对基础设计做刨析和解释。

TI 也会发布基于双天线的小型化参考设计，如下图。

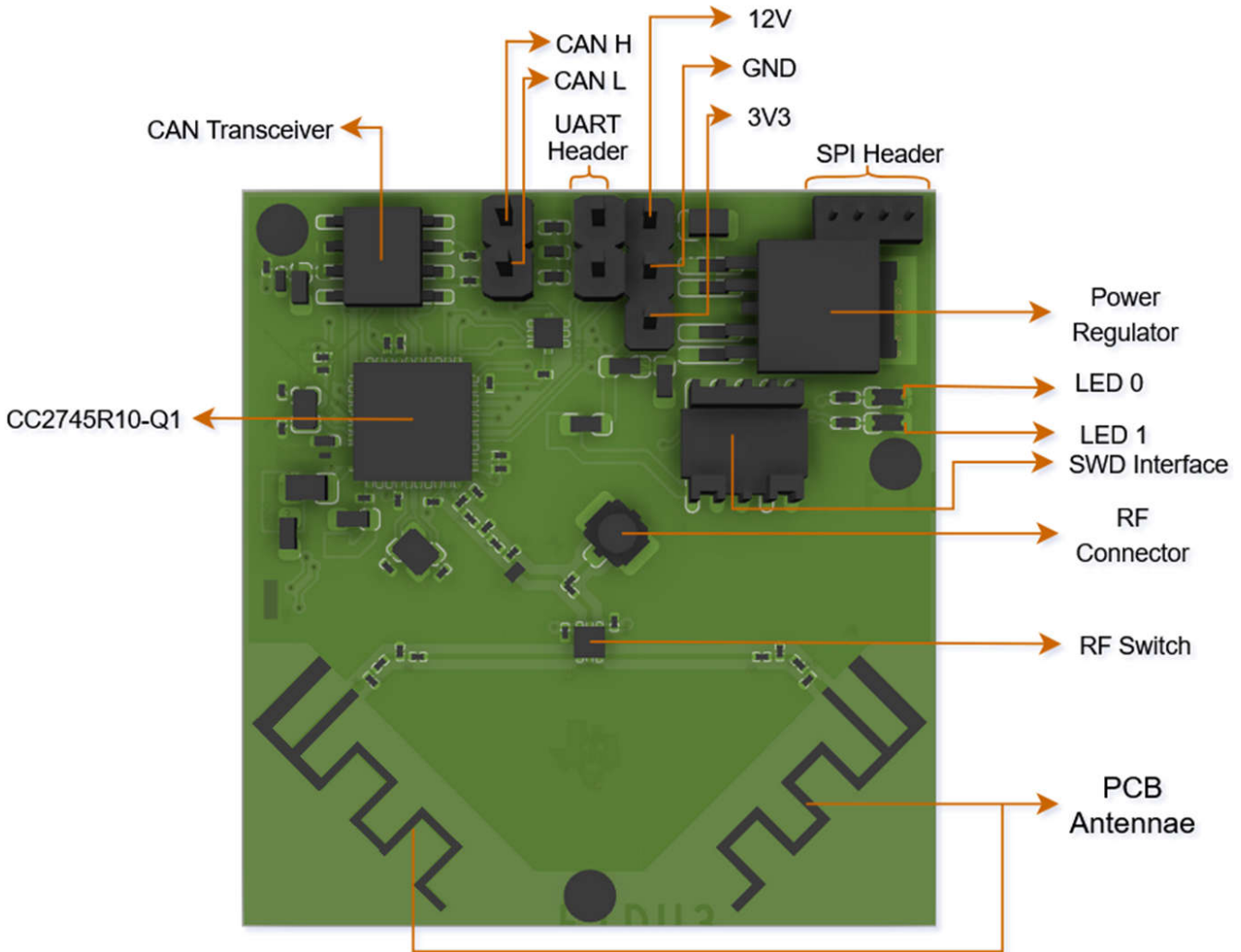


图 6-1. CC2755 参考双天线参考板

6.4 单天线和多天线

6.4.1 天线数量对信道探测测距性能的影响

在蓝牙信道探测（Channel Sounding, CS）中，天线配置是影响测距精度与系统稳健性的关键设计因素。

6.4.2 相位测距中的天线角色

蓝牙信道探测采用相位测距 (Phase-Based Ranging, PBR) 和往返时间 (Round-Trip Time, RTT) 两种方法进行距离估算。其中, PBR 利用射频信号的相位旋转特性——信号经过距离 D 传播后会产生相位偏移, 通过测量不同频率信号间的相位差来计算设备间的相对距离。该过程本质上依赖对无线信道传输特性的精确感知。

单天线配置下, 设备仅能从一个固定的空间采样点获取信道的幅度和相位信息 (即 IQ 数据)。然而, 现实环境中的无线信道并非理想模型——设备间的相对方位变化、人体遮挡、环境障碍物以及多径效应等因素, 均会导致接收信号的相位信息发生畸变, 从而在距离估计算法中引入误差。

多天线配置的根本优势在于引入了空间分集 (spatial diversity)。通过在不同空间位置布设多根天线, 设备能够从多个角度对同一信道进行采样, 获取多组独立或弱相关的 IQ 数据。这为后续的信号处理——如通过多径识别和最优路径选择来抑制环境干扰——提供了冗余信息, 从而提升测距的可靠性与精度。以下将对此展开详细分析。

6.4.3 单天线配置的优劣势分析

6.4.3.1 优势：简洁与低成本

单天线配置的最大优势在于其硬件设计的简洁性。仅需一个射频收发链路和一根天线, 无需射频开关和多路复用电路, 显著降低了物料成本和 PCB 布局复杂度。对于对精度要求不高、或工作环境较为理想的测距应用, 单天线配置能够满足基本需求。

6.4.3.2 劣势：受限于多种干扰因素

单天线测距的可靠性受到多方面因素的限制。首先, 天线相对朝向的影响是不可控的。在移动设备场景中, 两个设备天线的相对方向无法预测。某些特定的朝向会产生与频率相关的零值点, 导致信号幅度严重衰减。在蓝牙信道探测中, 这种衰减会导致 PBR 测量的 IQ 数据出现相位信息失真, 从而在距离估算中引入误差。

其次, 多径干扰是单天线配置面临的核心挑战。在室内环境中, 信号经墙壁、地面、人体等障碍物反射后形成多条传播路径到达接收端。这些多径分量具有随机的相位和幅度, 相互叠加后会扭曲真实的相位测量结果。对单天线设备而言, 它无法区分哪些 IQ 数据来自直达路径 (Line-of-Sight, LoS)、哪些来自反射路径 (多径), 从而无法剔除受污染的测量值。设备与设备之间的相对方位、人体、环境中的障碍物以及多径干扰, 这些因素共同作用, 限制了单天线测距的可靠性。

最后, 精度上限受限。蓝牙技术联盟在引入信道探测功能时, 提出了在大多数场景下实现 0.5 米目标测距精度的要求。然而, 在大多数实际使用场景中, 如果不使用多个天线, 要可靠地达到 0.5 米精度是很困难的, 甚至是不可能的。有业界实践表明, 单天线配置下的相位测距精度受规范约束难以显著超越这一水平, 其根本原因在于无法有效对抗上述多种环境干扰。

6.4.4 多天线配置的优劣势分析

6.4.4.1 优势一：空间分集带来的抗多径能力

多天线配置最核心的优势在于引入空间分集以对抗多径效应。当设备配备两根或更多天线时, 不同天线所经历的无线信道——包括直达路径和各反射路径的相对增益与相位——通常是独立或弱相关的。这意味着, 即使某一天线遭遇了严重的频率选择性衰落或处于深度零值点, 其他天线仍可能接收到质量良好的信号。通过分析来自多个天线路径的 IQ 数据, 设备可以识别并剔除受到严重多径污染的测量值, 从而提高测距的稳健性。

从原理上看, 多天线配置之所以能有效对抗多径, 是因为不同空间位置的天线对应不同的信道冲激响应。当存在多条传播路径时, 某些天线位置可能恰好处于直达路径与某条强反射路径的相位抵消点, 而另一位置的天线则可能处于两者同相叠加的区域。通过综合多个天线的测量结果, 系统可以在不增加带宽的前提下, 获得对信道空间分布的更多观测, 从而提升对直达路径的辨识能力。

6.4.4.2 优势二：缓解天线朝向敏感性问题

如前述, 单天线配置下设备天线的相对朝向会显著影响测距性能——某些朝向会产生频率依赖的零值点, 导致 IQ 数据失真。多天线设备通过在不同朝向上布置多根天线, 可以从不同空间方向交换基于相位的数据。即便某一朝向产生零值点, 其他朝向的天线仍可能提供无失真的 IQ 数据, 从而显著提升系统的鲁棒性。无失真的 IQ 数据是实现高精度距离估算的核心前提。

6.4.4.3 优势三：精度与鲁棒性的双重提升

多天线配置不仅提升了系统的抗干扰能力，还直接转化为测距精度的提升。蓝牙信道探测标准支持最多四条天线路径，通过多天线测量可以进一步优化距离估算的准确性。来自业界工程实践的经验表明，在至少一侧设备上部署多根天线可使测距更加稳健——虽然单次测量的精度不一定提升，但可以通过剔除部分受干扰的“坏”测量值，获得更可靠的测距结果。此外，双天线架构通过减少衰落和多径效应，能够提供典型配置两倍的精度提升。

6.4.4.4 劣势：硬件复杂度与成本增加

多天线配置的主要代价在于硬件复杂度的提升。首先，需要在设备上布设多根天线，并设计射频开关 (RF Switch) 以实现不同天线路径的切换，这增加了 PCB 面积和物料成本。其次，多天线意味着更多的射频路径需要校准，以消除各路径间因电路差异引入的相位偏差。此外，由于信道探测过程中需要从多个天线路径采集和交换 IQ 数据，设备之间需要交换更多的数据量以完成距离估算。最后，多天线配置对天线的布局和隔离度设计提出了更高的要求，在紧凑型产品中需要精心权衡。

6.4.5 双天线设计注意事项

从以上分析不难看出，在蓝牙信道探测中引入双天线配置是提升测距精度与系统鲁棒性的关键设计决策。然而，双天线的引入并非简单的硬件叠加，它涉及天线布局、射频开关选型、切换时序、通道校准以及软件配置等多个层面的协同设计。

除了每个天线的特性指标 (效率，方向性等) 最优之外，比较理想的还需满足：

- **天线朝向：**推荐将两天线以 90 度正交方式布置。正交放置可以使两天线覆盖不同的极化方向——当天线 A 处于某种极化方向的零值点时，天线 B 在正交极化方向上仍能保持良好接收。这种设计从根本上缓解了设备相对朝向不可控所导致的信号衰减问题。
- **天线间距：**天线之间的间距是决定空间分集效果的核心参数之一，推荐将两天线之间的距离设置为 31.1 mm。这一数值对应 2.4 GHz 信号的 1/4 波长，在该间距下，两天线经历的无线信道具有充分的去相关性，从而实现有效的空间分集增益。如果由于尺寸问题没办法保证 1/4 波长的间距的话，双天线对于性能的收益也是很明显的。在现有版型下尽量最大化。
- **走线对称性：**双天线射频前端走线应尽可能保持对称。信道探测本质上是一种基于相位的测量技术，射频路径上的任何不对称——包括走线长度差异、匹配网络差异、过孔数量差异等——都会引入额外的相位偏移，从而在距离估算中叠加系统性误差。因此，从射频开关输出端到天线馈点之间的走线应保持长度相等、结构一致。
- **天线类型选择：**为了确保信号的可参考性，两个天线类型保持一致。推荐使用倒 F 天线 (Inverted-F Antenna, IFA) 作为双天线设计的首选天线形式。IFA 具有结构紧凑、辐射效率高、易于在 PCB 上实现等优点，且在 2.4 GHz 频段性能稳定。具体的天线尺寸和匹配网络设计可参考 TI 应用手册[43]。如选择陶瓷芯片天线等其他类型，亦应确保两天线的型号和匹配电路完全一致，以最小化路径间相位差异。

6.5 测试结果

笔者对近距离下 TI 的参考设计做了 60cm，100cm，200cm 的可视距离测试。

后处理流程示意图如 图 6-2 所示：

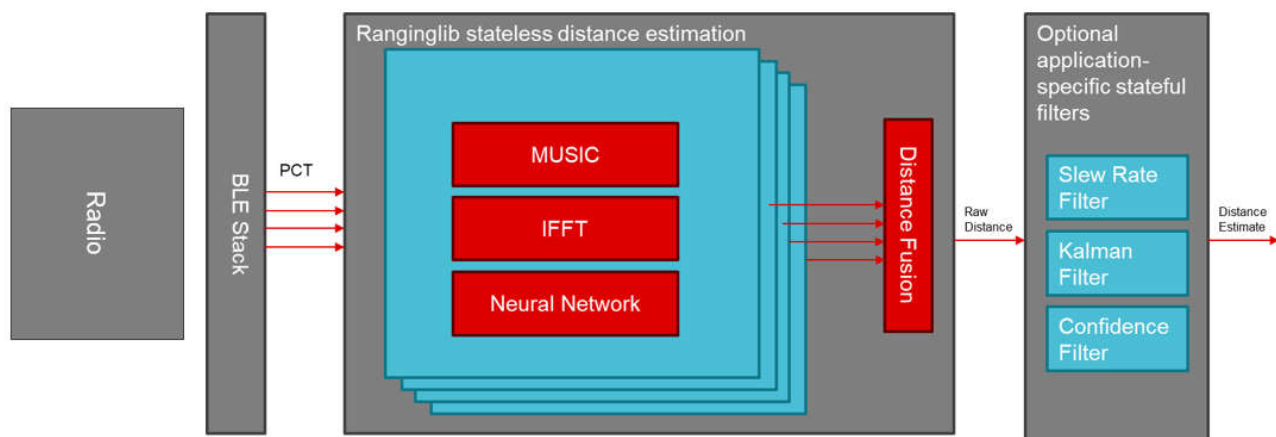


图 6-2. 基于相位测量 (PBR) 的融合后处理流程

- 多算法优势：融合神经网络、快速傅里叶变换 (FFT) 与 MUSIC (多信号分类) 算法的优势。
- 误差补偿：各算法的劣势可通过其他算法的优势抵消。
- 多径抑制：MUSIC 算法在解耦多径干扰方面表现尤为突出。
- 频谱精度：FFT 可提供频域洞察以提升分辨率。
- 实时处理：融合机制降低了计算开销。
- 障碍场景性能：在非视距 (NLOS) 条件或高反射/干扰场景下表现更优。

6.5.1 硬件配置

- TI 双天线参考板+XDS110 接口板。
- Initiator 端用电脑供电并抓取数据，运行 Python 脚本，进行显示。
- Reflector 端用移动电源供电。

6.5.2 软件配置：

- **SIMPLELINK-LOWPOWER-F3-SDK**- The CC27xx devices.
- Version: 9.14.02.16

6.5.3 环境搭建：

采用开放空间，利用地面网格 (20cm/15 度) 做多场景测试，测试版架高 1.3 米。

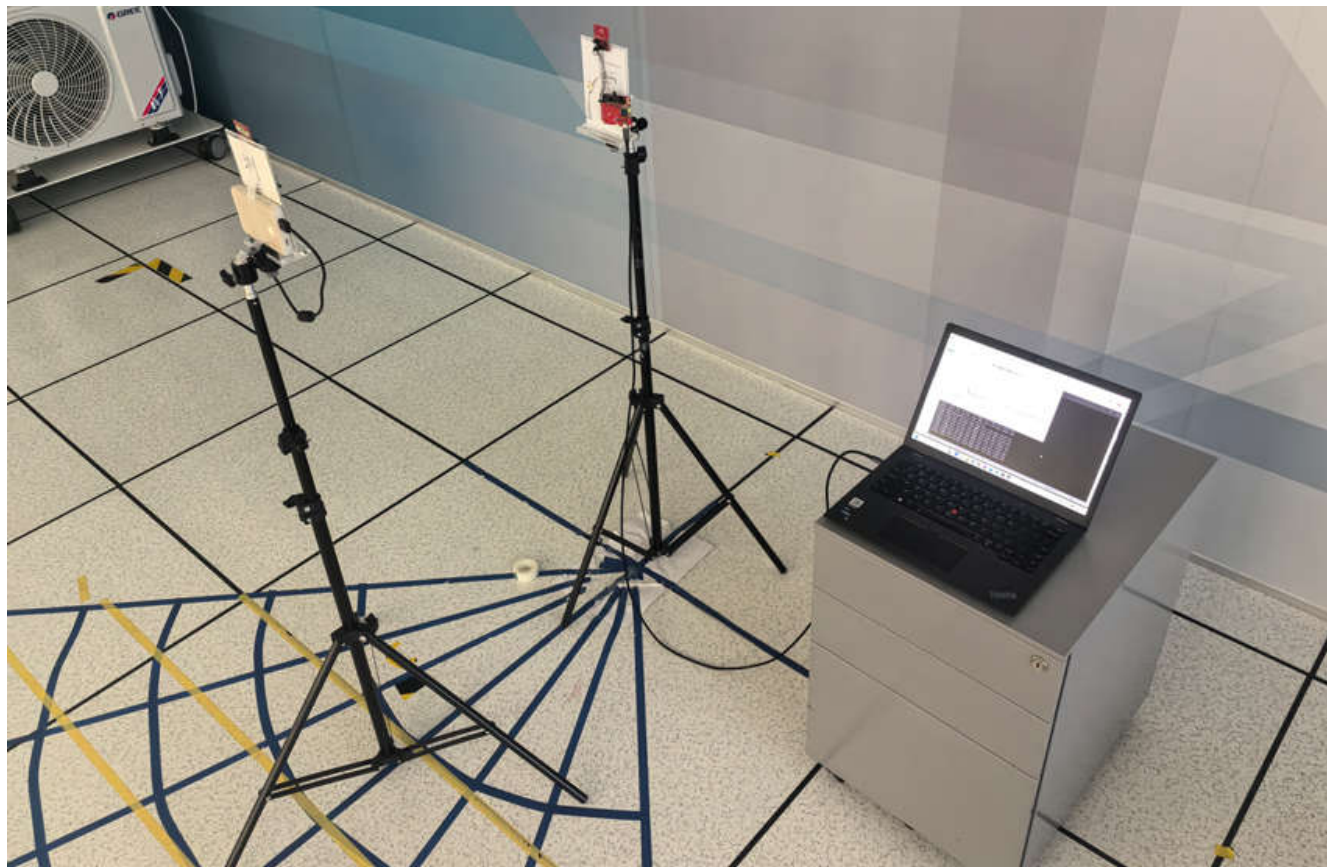


图 6-3. 测试环境实景

结果如图 6-4，图 6-5 和图 6-6。基本符合预期。

其中 UD 为经过 NPU/APU 算法处理之后的数据，FD 为应用层再叠加滤波平滑处理之后的结果。

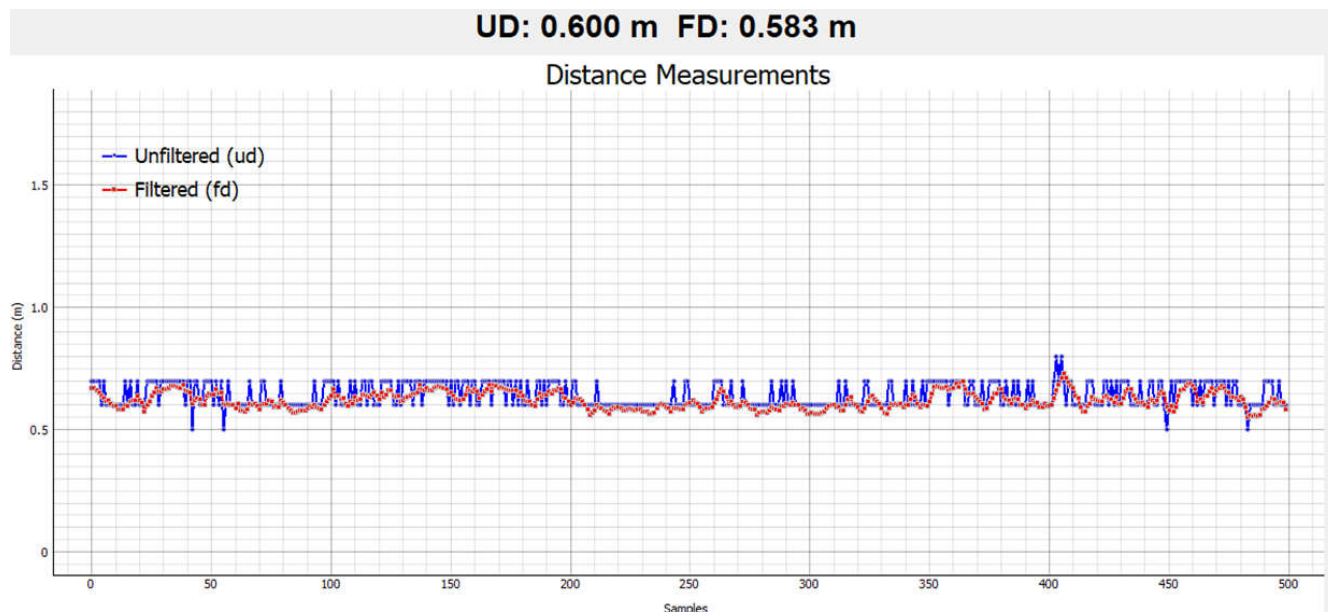


图 6-4. 实际 60cm 测试距离

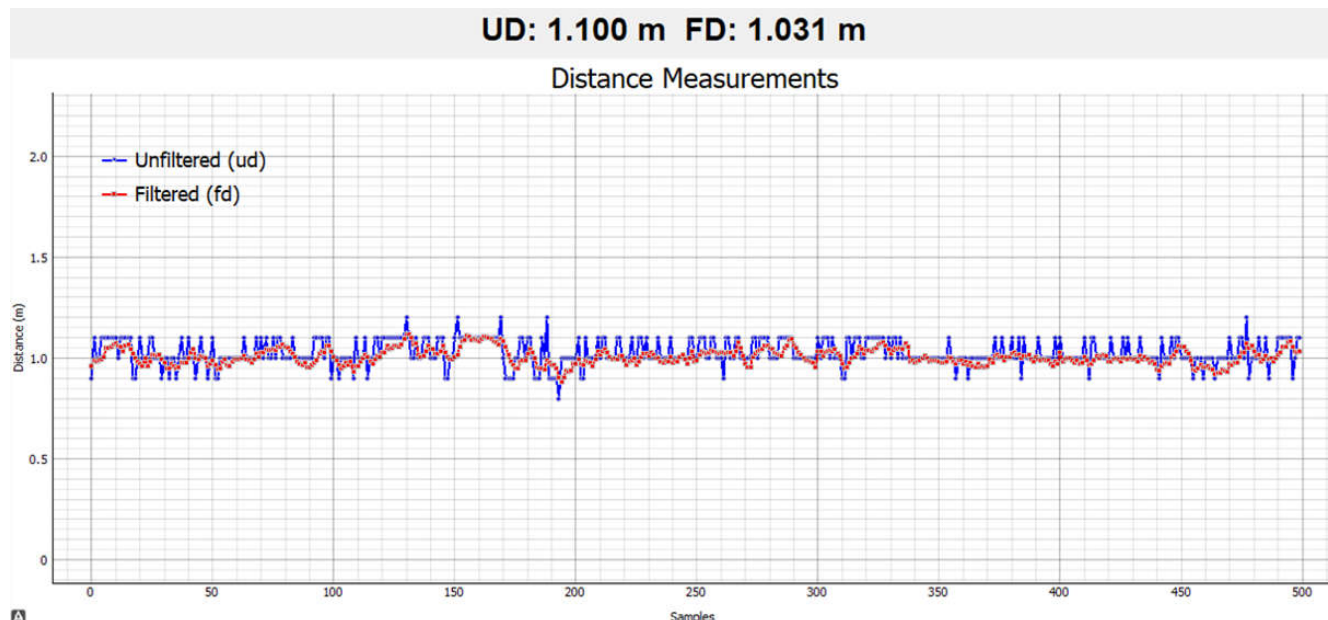


图 6-5. 实际 100cm 测试距离

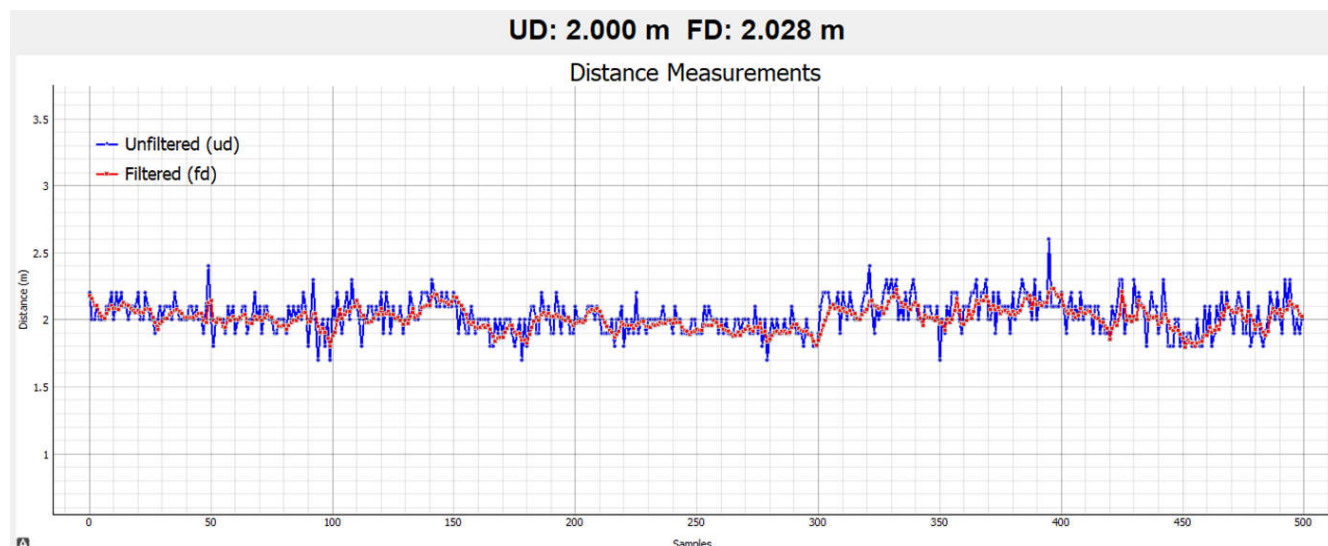


图 6-6. 实际 200cm 测试距离

6.6 功耗仿真

本文只介绍了 TI 可以用于仿真的工具。并没有对具体方案提出建议。

读者可根据实际用户体验来使用工具优化相关参数（比如连接/广播周期，CS 测量的频率及场景，休眠/唤醒的占空比等），大大节约调试时间。

参考工具：[BT-POWER-CALC](#) — Bluetooth Power Calculator for CC13xx, CC26xx, CC23xx, and CC27xx devices

7 总结

本文详细介绍了基于 TI CC2755 无线 MCU 的智能门锁无钥匙进入系统设计。

信道探测技术相比传统 RSSI 测距方案在精度、稳定性和安全性方面均有质的飞跃。基于 CC2755 的系统可实现厘米级测距精度，为智能门锁提供真正可靠的无感进入体验。推荐采用双天线设计方案以进一步提升测距精度和复杂环境适应性。

针对房间内外区分的核心工程问题，本文提出了多级门限与滞回比较、双天线信道特征识别、双蓝牙模块方案和接近感应传感器辅助等实用方案，并给出了融合决策策略，确保系统能够准确区分用户是在室内还是室外，有效避免误触发开锁。

TI 提供了完整的 SimpleLink™ SDK、信道探测参考设计、多天线评估板和硬件 PCB 设计参考，可帮助开发人员快速将信道探测技术应用于智能门锁产品。

8 参考文档

1. 德州仪器 (TI), [CC2755x10 SimpleLink 系列 2.4GHz 高性能无线 MCU 数据表](#)。
2. 德州仪器 (TI), [利用嵌入式处理器提升边缘智能白皮书](#)。
3. 德州仪器 (TI), [TPS62745 面向低功耗无线应用的双节超低 IQ 降压转换器 数据表 \(Rev. A\)](#)。
4. 德州仪器 (TI), [使用 4 节 AA 电池并可实现 5 年以上电池使用寿命的智能锁参考设计 \(Rev. C\)](#)。
5. 德州仪器 (TI), [TPS62745 降压转换器评估板用户指南](#)。
6. 德州仪器 (TI), [采用 SOT563 封装的 TPS562202 4.3V 至 17V 输入、2A 同步降压转换器 数据表](#)。
7. 德州仪器 (TI), [采用 SOT563 封装的 TPS563202 4.3V 至 17V 输入、3A 同步降压转换器 数据表 \(Rev. B\)](#)。
8. 德州仪器 (TI), [TPS562202 降压转换器评估模块用户指南 \(Rev. A\)](#)。
9. 德州仪器 (TI), [TPS563202 降压转换器评估模块用户指南 \(Rev. B\)](#)。
10. 德州仪器 (TI), [在光伏应用参考设计中适用于电弧检测的模拟前端 \(Rev. B\)](#)。
11. 德州仪器 (TI), [TPS62901 采用 1.5mm × 2mm QFN 封装的 3V 至 17V、高效率、低 IQ 降压转换器 数据表 \(Rev. A\)](#)。
12. 德州仪器 (TI), [采用 1.5mm × 2mm QFN 封装的 TPS629023V 至 17V、高效率和低 IQ 降压转换器 数据表 \(Rev. A\)](#)。
13. 德州仪器 (TI), [采用 1.5mm × 2mm QFN 封装的 TPS62903 3V 至 17V、高效率和低 IQ 降压转换器 数据表 \(Rev. A\)](#)。
14. 德州仪器 (TI), [TPS6290x 降压转换器评估模块用户指南 \(Rev. A\)](#)。
15. 德州仪器 (TI), [高功率密度 17V、3A 降压转换器参考设计](#)。
16. 德州仪器 (TI), [TPS562211 采用 SOT583 封装的 4.2V 至 18V 输入、2A 同步降压转换器 数据表 \(Rev. A\)](#)。
17. 德州仪器 (TI), [TPS563211 采用 SOT583 封装的 4.2V 至 18V 输入、3A 同步降压转换器 数据表 \(Rev. A\)](#)。
18. 德州仪器 (TI), [TPS562211 降压转换器评估模块用户指南 \(Rev. A\)](#)。
19. 德州仪器 (TI), [TPS563211 降压转换器评估模块用户指南 \(Rev. A\)](#)。
20. 德州仪器 (TI), [TPS629203 具有 DCS-Control 拓扑的 300mA、3V 至 17V 低 IQ 降压转换器 数据表](#)。
21. 德州仪器 (TI), [TPS629206 具有 DCS-Control 拓扑的 600mA、3V 至 17V 低 IQ 降压转换器 数据表](#)。
22. 德州仪器 (TI), [TPS629210 3V 至 17V、1A 低 IQ 降压转换器, 采用 SOT-583 封装 数据表 \(Rev. B\)](#)。
23. 德州仪器 (TI), [TPS629203 降压转换器评估模块用户指南](#)。
24. 德州仪器 (TI), [适用于服务器应用的 19W、5V 和 12V 交流/直流多输出、ZVS 反激式参考设计](#)。
25. 德州仪器 (TI), [TPS629206 降压转换器评估模块用户指南](#)。
26. 德州仪器 (TI), [TPS629210 降压转换器评估模块用户指南](#)。
27. 德州仪器 (TI), [具有 PWM、PH/EN 以及半桥控制接口和低功耗睡眠模式的 DRV8210 11V H 桥电机驱动器 数据表 \(Rev. B\)](#)。
28. 德州仪器 (TI), [具有 PWM 接口和低功耗睡眠模式的 DRV8210P 11V H 桥电机驱动器 数据表](#)。
29. 德州仪器 (TI), [具有 PWM、PH/EN 以及半桥控制接口和低功耗睡眠模式的 DRV8212 11V H 桥电机驱动器 数据表 \(Rev. B\)](#)。
30. 德州仪器 (TI), [具有 PWM 接口和低功耗睡眠模式的 DRV8212P 11V H 桥电机驱动器 数据表 \(Rev. A\)](#)。
31. 德州仪器 (TI), [具有低功耗睡眠模式的 DRV821x 低电压 H 桥电机驱动器评估模块](#)。
32. 德州仪器 (TI), [低成本血压和心率监测仪参考设计](#)。
33. 德州仪器 (TI), [DRV8847 双通道 H 桥电机驱动器评估模块](#)。
34. 德州仪器 (TI), [用于呼吸应用的鼓风机和阀门控制参考设计](#)。
35. 德州仪器 (TI), [DRV8832 评估模块](#)。
36. 德州仪器 (TI), [具有集成电流检测和调节功能的 DRV8876 H 桥电机驱动器 数据表 \(Rev. A\)](#)。
37. 德州仪器 (TI), [DRV8876 单通道 H 桥电机驱动器评估模块](#)。
38. 德州仪器 (TI), [集成电流感应的优势](#)。
39. 德州仪器 (TI), [具有失速检测和速度控制功能的 18V、2A、25mm 有刷直流电机驱动器参考设计](#)。
40. 德州仪器 (TI), [DRV8213 具有集成电流检测、电流调节和失速检测功能的 4A 有刷直流电机驱动器 数据表](#)。
41. 德州仪器 (TI), [DRV8214 具有纹波计数、失速检测和速度调节功能的 2A 有刷直流电机驱动器 数据表](#)。
42. 德州仪器 (TI), [DRV821x 和 DRV823x 评估模块 \(Rev. A\)](#)。
43. 德州仪器 (TI), [CC23xx 和 CC27xx 硬件配置与 PCB 设计注意事项 \(Rev. A\)](#)。

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