

低功耗射频前端电路设计及其在物联网中的应用

侯文轩

同济大学 上海市 200092

摘要: 随着物联网 (IoT) 技术的快速发展, 低功耗射频前端电路设计成为支撑设备长续航、广覆盖的核心技术。射频前端作为无线通信系统的关键模块, 负责信号放大、调制解调及频率转换, 其功耗直接影响终端设备的电池寿命和系统效率。在物联网场景中, 设备通常部署于偏远或难以维护的环境, 对功耗、成本及可靠性提出更高要求。本文将从低功耗射频前端电路设计基础出发, 探讨其技术实现路径, 并结合物联网应用场景分析其实际应用价值。

关键词: 物联网 (IoT); 低功耗射频前端电路; 电路设计; 技术实现路径; 应用价值

1 低功耗射频前端电路设计基础

1.1 射频前端基本架构与功能模块

射频前端电路通常由低噪声放大器 (LNA)、混频器、功率放大器 (PA)、滤波器及天线开关等模块构成, 各模块协同完成信号接收与发射任务。在接收链路中, LNA 负责放大微弱信号并抑制噪声, 混频器将高频信号下变频至中频或基带, 滤波器则滤除带外干扰。发射链路中, PA 将基带信号上变频并放大至发射功率, 滤波器确保信号频谱纯净度。

在物联网应用中, 射频前端需支持多频段、多模式切换, 例如同时兼容 Sub-GHz 频段 (如 433MHz、868MHz) 与 2.4GHz 频段 (如蓝牙、Wi-Fi) [1]。这种灵活性要求模块具备高度集成化设计。

1.2 低功耗设计关键技术

1.2.1 供电电压优化

降低供电电压是减少动态功耗的核心策略之一。根据功率公式: $P = C \cdot V^2 \cdot f$, 供电电压的平方与功耗直接相关, 因此电压的微小降低可显著降低能耗。然而, 降低电压会引发增益下降、非线性失真加剧等问题, 需通过电路架构创新予以补偿。此外, 动态电压调节 (DVS) 技术可根据信号强度实时调整供电电压。

1.2.2 电流源优化

为兼顾线性度和功耗, 需要考虑电流源设计。可通过电流复用使得多个放大器可以共享一个电流源, 从而消除多条偏置电路所带来的功耗。还可以通过使用衬底偏置技术自动调节晶体管的基板上的电压, 在低功耗状态下提高阈值、降低泄漏电流; 高性能状态下可降低阈值使响应时间加快。

使用自调整偏置电路也可在负载变化时实现实时电流调整, 在信号处于休眠状态时降低至毫安级从而延长电池寿命。

1.2.3 噪声系数优化

噪声系数 (NF) 是衡量接收灵敏度的关键指标, 直接影响通信距离与可靠性。分布式放大器结构通过级联多个晶体管并分配增益, 在宽频带内实现低噪声与高平坦度。共源共栅拓扑则通过叠加晶体管堆叠层数提升增益, 同时利用共栅管的低噪声特性优化 NF [2]。此外, 采用噪声消除技术 (如反馈电阻或电感峰值) 可进一步抑制热噪声。

1.3 低功耗模式与自适应技术

动态功耗管理控制方式是通过不同模块的细致调控, 对电源使用进行节能减排。休眠模式会将一些次要模块 (例如 PA 及 ADC 等) 处于关闭状态, 电源使用就降到纳米级; 系统激活, 激活型的高速启动设备 (例如电荷泵或低压差稳压器等) 即可在短时间内让模块重新运作。AGC (automatic gain control) 技术依据接收端信号强弱来对 LNA (低噪声放大器) 增益、PA (功率放大器) 功率进行自动调节。此外, 还有机器学习方式, 通过对信号特性的预报以提前设置电路参数。

2 低功耗射频前端电路设计方法

2.1 电路级设计优化

2.1.1 低功耗放大器设计

低噪声放大器 (LNA) 作为接收链路的首级模块, 其功耗直接影响整体能效。共源放大器与共栅放大器因其结构简单、噪声性能优异, 成为低功耗 LNA 的主流选择。(1) 差分电流模式 LNA。运用 $0.18 \mu\text{m}$ CMOS 工艺设计双端口电流

型 LNA，通过输入匹配网络（匹配网络包含变压器）在宽频段设计提供低噪声。该变压器可以用于阻抗匹配，也可以用于减少二次谐波失真。（2）共源共栅结构优化。利用共同源极共同栅极串并联的结构设计增加反向隔离度，并采用其低噪声特性改进 N_f 。（3）电流复用技术。将 LNA 与混频器共享电流源，减少冗余偏置电路。例如，在 LoRa 接收机中，通过复用 LNA 与混频器的尾电流，整体功耗降低 40%^[3]。

2.1.2 低功耗混频器设计

混频器需在转换增益、线性度与功耗间权衡。无源混频器因无需直流偏置成为低功耗首选，而有源混频器则通过架构创新降低功耗。（1）采用吉尔伯特双平衡结构设计的无源混频器，利用衬底偏置和低电流电压输入的方法降低功耗。（2）利用电流复用技术实现有源混频器降低总功率消耗，通过将跨导级和开关级集为一个电流来实现。

2.1.3 低功耗滤波器设计

设计滤波器时必须兼顾通带平滑程度、阻带抑制程度及低插入损耗问题。LC 梯形结构和开关电容阵列技术是低功耗滤波器的主流实现技术。LC 梯形滤波器通过优化电感与电容值实现高 Q 值与低插入损耗。开关电容阵列滤波器通过开关电容阵列动态调整中心频率，适应多频段需求。

2.2 系统级设计优化

2.2.1 时钟与采样频率优化

时钟频率与采样率直接影响动态功耗。降低时钟频率可减少开关活动率，但需权衡信号处理速度与误码率。（1）低时钟频率 ADC。蓝牙低功耗使用 16MHz 时钟频率的逐次逼近寄存器（sar）adc，在优化比较器的延迟以及电容阵列匹配的基础上，达到 1ms/s 采样率、9bit 的分辨率，相比传统设计降低 30% 的功耗。（2）动态时钟门控。在信号空闲期关闭部分时钟域，例如在 Wi-Fi 6 芯片中，通过动态时钟门控技术将待机功耗从 10mW 降至 0.5mW。

2.2.2 功率控制与信号处理算法

功率控制技术通过动态调整发射功率与接收增益，实现能效优化。（1）包络跟踪（ET）技术。通过动态调整 PA 的供电电压来匹配信号的包络，提升 PA 的效率。（2）数字预失真（DPD）算法。通过补偿 PA 非线性失真，降低回退功率需求。（3）自适应调制与编码（AMC）。根据信道质量动态调整调制阶数与编码速率。

2.2.3 抗干扰设计

抗干扰设计通过前端滤波与信号处理算法抑制带外干扰，避免因重传导致的功耗增加。（1）SAW 滤波器与 LNA 集成。采用声表面波（SAW）滤波器与 LNA 的集成模块，通过高 Q 值 SAW 滤波器实现 60dB 带外抑制，同时 LNA 采用噪声抵消技术将噪声系数控制在 1.5dB 以内。（2）认知无线电技术。通过频谱感知动态避开干扰频段，例如在 Sub-GHz IoT 中，认知无线电技术可将频谱利用率提升 30%，同时降低因干扰导致的重传功耗。

2.3 CMOS 工艺在低功耗设计中的应用

CMOS 工艺因高集成度与低成本成为物联网射频前端的主流选择。例如，采用 28nmFD-SOI 工艺的射频收发器，通过背偏置技术动态调整晶体管阈值电压，实现功耗与性能的灵活配置。此外，晶圆级封装（WLP）技术可减小芯片尺寸并降低寄生参数。

3 低功耗射频前端在物联网中的应用

3.1 物联网应用场景分析

物联网设备通常部署于偏远或难以维护的环境，对功耗、成本及可靠性提出极高要求。低功耗射频前端通过延长电池寿命、降低维护成本，成为物联网大规模部署的关键技术。

3.2 典型应用案例

3.2.1 基于 Sub-GHz 频段的物联网传感器

Sub-GHz 频段（如 433MHz、868MHz、915MHz）凭借其低传播损耗、强穿透能力及长距离覆盖特性，成为智能抄表、环境监测、农业物联网等大规模部署场景的首选。

以采用 STM32WL 系列芯片为主的 LoRa 感知器为例，介绍以下几种方式如何提升感知器的低功耗和超长工作时间。具体：（1）DVFS 技术。芯片可根据信噪比调节射频收发器的电源电压和时钟频率，低信噪比的环境下，在满足感知器正常工作的前提下，降低电源电压从而降低其功耗，实测表明节能效果较常规的提升 40%；（2）电流共用与休眠。采用一种先进的方案，将时钟信号的芯片射频收发器和 MCU 进行共享，减少增加的其他元器件数量，提供了一种精准的休眠算法，即在无法完成信息传输的情况下，将射频收发器设置为最低功耗（电流值约为 $1\mu A$ ），同时利用延时唤醒命令，使之处于延时激活工作状态，总体时间控制在 $50\mu s$ 以内；（3）电源管理。假设采用 1.5VER14505 锂离子电池，（19Ah）连续传输一次工作日报告（数据传

输一次所需时间 200ms)，最长可持续时间约 12 年。当处于发射模式 (+20dbmoutput) 的瞬态功耗达到 120ma，但是采用快速发射 (<500ms) 和深度休眠的组合工作模式可将平均功耗降低至 $5\mu\text{w}$ 以下^[4]。在欧洲某智能水表项目中，基于 STM32WL 的 LoRa 节点覆盖半径达 15km（开阔环境），且在地下室等复杂环境下仍能保持 -140dBm 的接收灵敏度，显著降低中继设备部署成本。

3.2.2 LoRaWAN/NB-IoT 模块的低功耗设计

LoRaWAN 与 NB-IoT 作为物联网两大主流低功耗广域网 (LPWAN) 技术，通过射频前端与协议栈的协同优化，在超远距离通信与超低功耗间取得平衡。

(1) Semtech SX1276 LoRa 芯片。①射频前端架构创新：采用直接变频接收机 (Direct Conversion Receiver) 与功率可调 PA，支持扩频因子 (SF) 7 至 12 动态调整。②功耗精细化控制：通过关闭非必要模块（如锁相环 PLL 的部分支路）将功耗控制在 10mA（典型值），较前代产品降低 30%。在 +20dBm 输出功率下功耗 120mA，但通过快速发射协议（如 LoRa Class A 的短突发传输）将单次发射时间压缩至 <500ms，平均功耗显著降低。结合 32kHz RTC（实时时钟）与超低功耗存储器，电流仅 $0.2\mu\text{A}$ ，支持长达 10 年的电池寿命。③应用场景验证：在澳大利亚某农业监测项目中，基于 SX1276 的土壤湿度传感器节点覆盖半径达 8km（农田环境），且在 -30℃ 低温下仍能稳定工作，电池更换周期延长至 8 年。

(2) 华为 Boudica 200 NB-IoT 芯片。①射频前端与协议栈联合优化：针对 NB-IoT 的窄带特性（180kHz），采用多模式 PA 与动态负载匹配技术，支持 3GPP Rel.14 协议的功率节省模式 (PSM) 与增强型非连续接收 (eDRX)。②功耗表现：在 PSM 模式中，通过完全关闭射频前端与部分数字电路，电流降至 $2.5\mu\text{A}$ ，适用于长周期上报场景（如每月 1 次）。在 eDRX 模式，在 10.24s 周期下，平均电流仅 $60\mu\text{A}$ ，兼顾实时性与功耗。③连续接收：在数据密集型场景（如紧急报警）下，功耗 23mA，支持 -164dBm 覆盖增强（通过重复发送 2048 次实现）。④工业级可靠性：在 -40℃ 至 85℃ 宽温域下，通过温度补偿偏置电路与 ESD 保护设计，射频前端性能波动 <1dB，满足智能电网、油气管道监测等严苛环境需求。

3.3 性能评估与对比

表 1 性能评估与对比

技术指标	LoRaWAN	NB-IoT	蓝牙 5.0
频段	Sub-GHz	授权频段 (如 800MHz)	2.4GHz
功耗 (接收)	10mA	5-20mA	15mA
传输距离	10-15km(开阔环境)	1-10km(城市环境)	100m(室内)
数据速率	0.3-50kbps	20-250kbps	1-2Mbps
典型应用	农业监测、智能抄表	智能停车、资产追踪	智能家居、可穿戴设备

LoRaWAN 凭借 Sub-GHz 频段的低功耗（接收仅 10mA）与超长传输距离（10-15km），成为农业监测、智能抄表等偏远或大规模部署场景的首选，但其数据速率较低（0.3-50kbps），适合低频次、小数据量传输；NB-IoT 在授权频段下实现功耗（5-20mA）与距离（1-10km）的平衡，且数据速率（20-250kbps）高于 LoRaWAN，适用于智能停车、资产追踪等需要一定实时性与覆盖深度的城市级应用；蓝牙 5.0 虽数据速率最高（1-2Mbps），但功耗（15mA）与传输距离（100m）受限，主要应用于智能家居、可穿戴设备等短距离、高带宽场景，依赖电池或持续供电环境。三者通过频段、功耗与速率的差异化设计，覆盖了物联网从广域到局域、从低速到高速的多样化需求。

4 结论

低功耗射频前端电路设计是物联网技术大规模部署的核心支撑。通过供电电压优化、电流源复用、噪声系数抑制等关键技术，结合 CMOS 工艺与系统级设计优化，可实现功耗与性能的平衡。在物联网应用中，Sub-GHz 频段与 LPWAN 技术（如 LoRaWAN、NB-IoT）因低功耗特性成为主流选择。未来，随着 5GRedCap、Wi-FiHaLow 等新技术的推广，低功耗射频前端将进一步向高集成度、多频段兼容方向发展，为物联网的万物互联提供更高效、可靠的通信保障。

参考文献：

- [1] 孔德钰. 基于人工神经网络的低功耗射频收发系统研究 [D]. 电子科技大学, 2019.
- [2] 戴若凡. RFSOI CMOS 射频前端关键电路技术研究 [D]. 中国科学院大学, 2016.
- [3] 曹弘坚. RFID 技术下的物联网前端感知系统设计与应用 [J]. 科技视界, 2017(4):1.
- [4] 曾辉. UHF RFID 标签芯片模拟射频前端电路设计 [D]. 电子科技大学 [2025-05-09].