

无线传感网络中低功耗信号采集电路优化方案探析

郭继玺

邢台市财政信息中心, 河北 邢台 054000

[摘要]文中聚焦于无线传感网络里低功耗信号采集电路的优化方案展开研究,就无线传感节点在长期部署、微型化供电、复杂环境感知状况下所面临的能耗限制与信号质量方面的矛盾予以分析,同时对低功耗传感器接口、模拟前端、模数转换、供电管理、系统协同控制等优化途径加以探讨。文章运用文献归纳、理论分析、工程实践总结三者相结合的方式,从无线传感网络节点功耗的组成、信号采集电路设计的要求、低功耗的关键技术、硬件电路的优化、系统级管理策略等方面展开论述。研究表明,低功耗信号采集电路不可仅仅依赖降低器件工作电流,而是要在采样策略、前端调理、ADC选择、电源管理、休眠唤醒、抗干扰设计之间达成协同。结论表明,借助低功耗器件选型、间歇式采样、事件触发采集、分级供电、动态功耗控制、软硬件联合优化,能够有效延长无线传感节点的生命周期,提高数据采集的可靠性、网络运行的稳定性。

[关键词]无线传感网络;低功耗;信号采集电路;模拟前端;电源管理

DOI: 10.33142/ec.v9i8.20214

中图分类号: TN710.5

文献标识码: A

Exploration on Optimization Scheme for Low Power Signal Acquisition Circuit in Wireless Sensor Networks

GUO Jixi

Xingtai Financial Information Center, Xingtai, Hebei, 054000, China

Abstract: This article focuses on the optimization scheme of low-power signal acquisition circuits in wireless sensor networks, analyzing the contradiction between energy consumption limitations and signal quality faced by wireless sensor nodes in long-term deployment, miniaturized power supply, and complex environmental perception conditions. At the same time, optimization approaches such as low-power sensor interfaces, analog front-end, analog-to-digital conversion, power management, and system collaborative control are explored. The article combines literature review, theoretical analysis, and engineering practice to discuss the composition of power consumption of wireless sensor network nodes, requirements for signal acquisition circuit design, key technologies for low power consumption, optimization of hardware circuits, and system level management strategies. Research has shown that low-power signal acquisition circuits should not rely solely on reducing device operating current, but should achieve synergy between sampling strategy, front-end conditioning, ADC selection, power management, sleep wake-up, and anti-interference design. The conclusion shows that with the selection of low-power devices, intermittent sampling, event triggered acquisition, graded power supply, dynamic power consumption control, and joint optimization of software and hardware, the lifecycle of wireless sensor nodes can be effectively extended, the reliability of data acquisition and the stability of network operation can be improved.

Keywords: wireless sensor network; low power consumption; signal acquisition circuit; simulate front-end; power management

引言

无线传感网络是由众多低功耗传感节点构成的,能够达成环境监测、工业控制、智慧农业、结构健康监测、物联网感知等功能。鉴于节点常常会被部署在供电受到限制、维护存在困难或者环境比较复杂的区域,所以功耗控制便成为了影响系统寿命、稳定性的关键要素。信号采集电路作为传感节点感知外界信息的核心模块,其不仅要确保采

样精度、抗干扰能力,还需尽可能地降低静态功耗、动态功耗。进行对于低功耗信号采集电路优化方案的研究,对于提高无线传感网络的应用价值有着重要意义。

1 无线传感网络信号采集电路的功耗特征

1.1 传感节点功耗构成复杂

无线传感节点一般是由传感器、信号调理电路、模数转换器、微控制器、无线通信模块、电源管理模块所构成

的。不同模块在工作状态的时候功耗差异是比较大的,其中无线通信模块的瞬时功耗相对较高,而信号采集电路有着工作比较频繁、待机时间比较长、精度要求较高等特点。倘若采集电路长时间处于开启状态,虽然单次采样电流比较小,但在长周期运行过程中也会造成一定的能量消耗。传感器激励、放大器偏置、滤波电路、ADC 转换、参考电压源都会产生功耗。所以,低功耗设计要从节点整体能量流动着手,明确各模块在唤醒、采样、处理、发送、休眠阶段的能耗比例。

1.2 信号质量与功耗控制存在矛盾

无线传感网络所采集的对象一般有温湿度、压力、振动、光照、气体浓度、电流、电压、位移等信号,其中部分信号的幅值比较微弱,频率相对较低,或者很容易受到环境干扰。为了能够提高采样精度,电路常常需要高性能的运算放大器、稳定的参考源、滤波网络、高分辨率 ADC,不过这些举措可能会使功耗增加。要是过度降低工作电流,那么又有可能致使放大器带宽不够、噪声增大、转换速度减慢、测量误差升高。低功耗信号采集电路优化的核心难点就在于,在能量有限的状况下达成精度、速度、噪声、稳定性、寿命之间的平衡。

2 低功耗信号采集电路设计的基本原则

2.1 按需采集与分时工作原则

在无线传感网络里面,有不少被测量的对象,其变化速度比较缓慢,故而并不要求传感节点始终以较高的频率进行采样。按照需求来采集数据、进行分时工作,乃是降低功耗的关键原则。节点能够依据监测对象的变化规律,设定不一样的采样周期。当环境处于平稳状态的时候,降低采样频率,而在变化比较明显的时候,提高采样的密度。信号采集电路还可以采用分时上电的方式,让传感器、放大器、滤波器、ADC 仅仅在采样窗口期间进行工作,在其余的时间段,进入休眠状态或者切断电源。分时工作能够有效降低平均功耗,不过要顾及器件的启动时间、稳定时间、首次采样误差,防止因为采样速度过快而造成数据偏差。

2.2 前端低噪声与低功耗平衡原则

信号采集电路的前端直接与传感器输出相接,其产生的噪声、失真情况会在后续环节中被放大。低功耗并非意味着要降低电路的所有性能,而是应该优先确保前端的关键指标得以保障。针对微弱信号而言,需选用具备低噪声、低偏置电流、合适带宽特性的放大器,针对低频信号来说,要关注失调电压、温漂、闪烁噪声等方面,针对高阻抗传感器来讲,应着重考虑输入阻抗和漏电流。前端进行优化

时要避免盲目采用高性能器件,这是因为过高的带宽、过大的驱动能力会造成不必要的能耗。合理的做法是依据传感器信号的幅度、频率范围、精度要求来匹配器件参数,进而使电路性能达到“够用且稳定”的状态。

2.3 系统协同与软硬件联合原则

信号采集电路进行低功耗优化时,不能仅仅依赖硬件参数的调整,还需要与嵌入式软件、通信协议、网络调度相互协作。微控制器能够对传感器供电、ADC 开启、采样时间、数据缓存、无线发送时机进行控制,网络协议可以借助减少冗余采样、数据融合、分簇传输等方式,降低节点的总体能耗,算法方面能够通过阈值判断、压缩采样、异常检测,减少无效数据的处理。硬件的作用是提供低功耗的基础,而软件的职责是实现灵活的调度。只有将软硬件联合起来进行设计,才能够让信号采集电路在满足监测任务要求的同时,降低平均能耗。

3 低功耗信号采集电路关键技术优化

3.1 传感器接口与激励电路优化

传感器接口作为信号采集链路的起始点。不同类型的传感器对于激励方式有着各异的需求,电阻式传感器常常需要恒定电压或者恒定电流来进行激励,电容式传感器则需要电荷转换接口或者频率转换接口,而电化学传感器对偏置稳定性有着较高的要求。在低功耗设计的过程当中,需要避免传感器长时间处于满功率激励的状态。对于那些能够间歇工作的传感器而言,可以采用脉冲激励或者周期性上电的方式,对于桥式传感器来说,能够通过降低激励电压、运用占空比控制、采用差分测量的办法来降低功耗,对于高阻抗信号,应该选用低漏电开关、高输入阻抗缓冲器。

3.2 模拟前端放大与滤波优化

模拟前端需完成多种功能,包括微弱信号放大、阻抗变换、滤波、电平匹配。低功耗模拟前端要依据被测信号频率来挑选适宜带宽,以此防止宽带放大器带来额外噪声和功耗。放大电路能够采用仪表放大器、斩波稳定放大器、低功耗运算放大器或者可编程增益放大器。针对低频慢变量信号,可降低放大器工作带宽、偏置电流,对于动态信号,要保证采样前端有足够压摆率和稳定时间。滤波器设计也得兼顾功耗,优先选用无源 RC 滤波或者低功耗有源滤波,并且按照采样频率设置抗混叠滤波。模拟前端优化要避免因过度简化致使噪声升高,同时也要防止堆叠过多级电路而造成能耗增加。

3.3 ADC 选择与采样策略优化

模数转换器是信号采集电路里比较重要的一个功耗

来源。不同的 ADC 结构有着不一样的功耗、性能特点。逐次逼近型 ADC 具备功耗比较低、速度比较适中而且易于集成等优势,适合大多数无线传感节点使用, $\Sigma\Delta$ 型 ADC 分辨率高、抗噪能力强,适用于低频高精度测量,不过其转换时间比较长,高速 ADC 适用于动态信号采集,只是功耗比较大。采样策略需要依照监测任务来设置分辨率、采样率、转换时序。对于慢变化信号,可以降低采样率并且采用多次平均的方式来提高稳定性,对于事件型信号,可以通过阈值触发的形式启动高速采样。当 ADC 不工作的时候应该及时关闭,参考源、采样保持电路同样也应当纳入功耗管理范围之内。

4 信号采集电路低功耗硬件实现路径

4.1 电源管理与分级供电设计

无线传感节点的寿命很大程度上受到电源管理模块的影响。低功耗信号采集电路适宜采用分级供电结构,把传感器、模拟前端、ADC、微控制器、无线模块划分成不同的电源域,依据工作状态来分别实施控制。对于对噪声敏感的模拟电路而言,应当选用低噪声稳压器或者进行合理滤波,以此防止开关电源纹波对采集精度产生影响,对于数字和通信模块,能够采用高效率 DC-DC 转换器来降低能量损耗。电源开关要选择低导通电阻、低漏电流的器件,同时要留意上电顺序、电压稳定时间。分级供电可让非工作模块完全休眠,是降低平均功耗的一种有效方式。

4.2 休眠唤醒与事件触发电路设计

多数情况下无线传感节点处于等待状态,休眠唤醒机制对平均功耗水平起着决定性作用。低功耗设计能够运用定时唤醒、外部中断唤醒、阈值比较唤醒、事件触发唤醒等多种方式。针对长期保持平稳状态的监测对象而言,可以使主控制器进入深度休眠状态,只留存低功耗时钟、必要比较器,当传感器信号超出设定阈值的时候,再将完整采集链路唤醒。事件触发电路应当采用纳安级或微安级的低功耗比较器,并且借助滞回设计防止噪声引发频繁唤醒。休眠唤醒设计的关键在于减少无效工作时间,并且防止漏检重要信号的变化。

4.3 PCB 布局与抗干扰低功耗协同

低功耗采集电路在处理微弱信号时,PCB 布局对噪声、漏电、功耗的表现有着显著影响。模拟信号线应当尽可能缩短长度,并且要远离无线射频模块、时钟线、开关电源节点,对于高阻抗输入端,则需要设置保护环或者隔离区域,以此减少板面漏电、杂散耦合现象的发生,模拟地和数字地必须进行合理分区,同时在合适的位置进行单点连接。电源去耦电容要靠近芯片电源引脚,传感器接口

要增加必要的防护与滤波措施。低功耗并非是减少所有外围元件,而是要保留对稳定性、抗干扰起着关键作用的器件。良好的 PCB 布局能够减少后期软件滤波、重复采样的需求,进而从系统方面降低能耗。

5 低功耗信号采集电路系统优化与发展方向

5.1 数据压缩与本地预处理协同降耗

无线传感网络之中通信能耗一般比较高,信号采集电路的优化需要和数据处理策略相结合。节点能够在本地对采集到的数据进行简单的预处理,像均值滤波、异常剔除、阈值判断、数据压缩等,仅仅上传有效或者变化比较明显的的数据,以此减少无线发送的次数。针对周期性监测数据而言,能够采用差分编码或者变化量上传的方式,针对多传感器节点,能够借助本地融合来减少冗余数据。虽说本地处理会消耗一定的计算能量,不过要是能够降低通信频率,整体能耗通常会更好。采集电路提供稳定的数据,算法减少无效传输,二者协同能够延长网络的生命周期。

5.2 能量采集与自适应功耗管理

在一些应用场景里面,可以引入太阳能、振动能、热能或者射频能量采集方式,以此为无线传感节点给予补充能量。这个时候信号采集电路需要支持自适应功耗管理,依据当前电池电量、环境能量输入、任务优先级来调整采样频率与工作模式。要是能量充足,节点能够提高采样精度、上传频率,要是能量不足,那就降低采样率、延长休眠时间或者只保留关键监测功能。自适应管理可以避免固定工作模式在环境变化时导致能量浪费或者节点过早失效。未来低功耗采集电路会更注重与能量采集模块、储能单元和功耗调度算法的深度融合。

5.3 面向集成化与智能化的优化方向

伴随物联网芯片、传感器技术持续进步,低功耗信号采集电路正朝着高集成度、智能化且可配置的方向发展。在片上把传感接口、可编程增益放大器、低功耗 ADC、数字滤波器还有电源管理单元集成起来,能够减少外围器件数量,降低布线寄生参数、系统噪声,提高采集精度与批量一致性。智能化采集电路会根据输入信号幅值、频率变化、环境状态自动调整增益、采样率、滤波参数与休眠唤醒模式,让系统在满足测量精度的情况下减少无效能耗。针对大规模无线传感网络,节点硬件还要有标准化接口、模块化结构、良好的可扩展能力,方便温度、压力、振动、气体等不同类型传感器快速接入。未来研究要进一步关注超低功耗模拟前端设计、异构能量采集与管理、边缘智能处理、抗干扰技术、高可靠封装工艺,使信号采集节点在复杂环境中维持长期稳定运行。

6 结论

在无线传感网络里,低功耗信号采集电路的优化有着关键作用,它可延长节点生命周期,提高网络稳定性还能保障数据质量。有研究显示,信号采集电路的功耗主要源于传感器激励、模拟前端偏置、ADC 转换、参考源供电、数据处理、待机泄漏等多个环节。低功耗优化并非单纯降低器件电流这么简单,而是要在采样任务、信号特征、电路性能、系统调度之间达成综合平衡。有效的方案包括选择低功耗的传感器接口,优化模拟前端的放大与滤波,合理配置 ADC 结构与采样策略,采用分级供电、休眠唤醒、事件触发、本地预处理等技术手段。PCB 布局、接地、抗干扰、电源完整性等方面,也会对采集电路实际功耗与可靠性产生影响。未来,无线传感网络低功耗信号采集电

路会朝着集成化、智能化、能量自适应方向发展,应进一步强化超低功耗器件、边缘计算、能量采集、系统级协同优化的研究,为物联网感知系统的长期稳定运行给予技术支撑。

[参考文献]

- [1]孙利民,李建中,陈渝,等.无线传感器网络[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [2]任丰原,黄海宁,林闯.无线传感器网络[J].软件学报,2003,14(7):1282-1291.
- [3]李善平,陈文智,边凯.无线传感器网络技术综述[J].计算机研究与发展,2004,41(1):1-8.

作者简介:郭继玺(1984—),男,汉族,河北邢台人,工程师,河北省委党校毕业,现就职于邢台市财政信息中心,从事财政科研工作。