

# 基于蓝牙 4.0 的微型核辐射剂量计设计

高超<sup>1</sup>, 卢亮亮<sup>2</sup>, 曹剑锋<sup>1</sup>

(1. 中国人民解放军防化学院, 北京 102205; 2. 探月与航天工程中心, 北京 100037)

**摘要:** 针对目前个人核辐射剂量监测手段便携性差、实时性较差和持续监测能力不足等问题, 设计了一种基于蓝牙 4.0 模块的微型低功耗核辐射剂量计; 系统使用计数管探测辐射粒子, 充分利用了 MSP430 混合信号处理器和蓝牙 4.0 模块的低功耗特性, 体积小、续航能力强、运行稳定可靠; 该剂量计配合手机 APP 即可单独使用, 又可多台组网使用, 可为人员提供持续可靠地实时剂量率监测和个人剂量分析, 在核工业及核医学个人防护领域具有广阔的应用前景。

**关键词:** 剂量率; 核辐射监测; 低功耗; 蓝牙 4.0

## Design of Micro Nuclear Radiation Dose Rate Monitor Based on Bluetooth 4.0

Gao Chao<sup>1</sup>, Lu Liangliang<sup>2</sup>, Cao Jianfeng<sup>1</sup>

(1. Institute of NBC Defense, Beijing 102205, China;

2. Lunar Exploration and Space Engineering Center, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Based on MSP430 mixed signal processor and Bluetooth 4.0 module, this paper designed a micro nuclear radiation dose rate monitor to improve its portability, real time feature and the ability of continuous monitor. The system used a G-M counter to detect the radiation particles, and it was designed smart, continuous and reliably by take advantage of the Ultralow-power feature of the MSP430 and Bluetooth 4.0 module. The micro monitor could provide sustained and reliable real-time dose rate monitoring for person and personal dose analysis by using a smartphone APP either single or multiple and has wide application prospects in the field of nuclear industry and nuclear medicine personal protection.

**Keywords:** dose rate; nuclear radiation monitor; low power; Bluetooth 4.0

## 0 引言

核辐射射线作用于生物机体, 辐射能量被机体吸收, 引起生物机体电离或激发, 使机体中的生物大分子的结构破坏, 影响组织或器官的正常功能, 严重时可能导致机体死亡<sup>[1]</sup>。准确及时的辐射剂量率测量, 不仅能够辐射环境从业人员提供科学的防护依据, 还可以在发生核泄漏、放射性污染等紧急事故时及时发出预警, 减少人员伤亡。目前的辐射监测设备主要针对环境监测、核素识别等运用领域, 普遍存在价格昂贵, 使用携带不便等问题。针对辐射环境从业人员个人剂量监测需要, 本文使用气体计数管, 以 MSP430 单片机为核心配合蓝牙 4.0 模块设计了一种可以测量实时剂量率、分析历史辐射剂量的便携式低功耗低成本个人辐射剂量设备。

## 1 系统设计

微型低功耗核辐射剂量计总体结构如图 1 所示。当有射线粒子进入计数管产生脉冲信号经放大整形电路处理形成数字脉冲信号, 单片机对该脉冲进行计数, 并按一定的时间周期进行统计。单片机测得的计数通过蓝牙 4.0 模块发送到智能手机, 由 APP 计算出实时剂量率。单片机还完成接收手机指令, 调整工作参数, 监测电池电量等功能。

系统的数据存储、分析、运行参数设置等功能由手机

APP 完成, 基于手机 APP 的辐射剂量率监控管理系统不在本文讨论范围内。

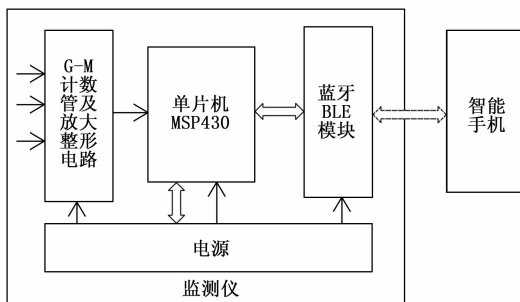


图 1 系统总体框图

## 2 硬件设计

### 2.1 单片机选型及资源分配

单片机选用 MSP430F149 可以在满足硬件需求的前提下充分降低功耗和成本。单片机资源及管脚分配如图 2 所示。2 个 8 位定时/计数器 TA 作为计时器产生周期中断对单片机进行唤醒, 同时为 ADC12 提供采样/保持脉冲; TB 作为计数器, 时钟输入端口接放大整形电路输出的脉冲信号; UART0 作为蓝牙 BLE 模块的通讯接口; 1 个 8/12 位 ADC 用于电池电量信息采集<sup>[2]</sup>。

### 2.2 计数管及放大整形电路

计数管工作时, 阳极上由高压电源  $V_{out}$  供给 400 伏以上高压, 当射线粒子在工作气体中产生的电子漂移到中心丝附近时, 漂移过程中获得的能量进一步电离与之碰撞的气体, 最后收集到的离子对总电荷量与射线粒子产生的原始电荷量  $Q$  成

收稿日期: 2016-07-01; 修回日期: 2016-12-15。

**作者简介:** 高超 (1984-), 男, 河北秦皇岛人, 工程师, 硕士研究生, 主要从事核辐射监测及电子信号处理方向的研究。

**通讯作者:** 卢亮亮 (1989-), 男, 浙江东阳人, 工程师, 硕士研究生, 主要从事深空探测总体技术方向的研究。

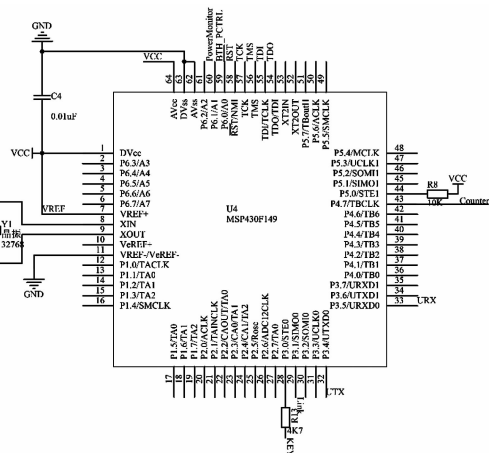


图2 单片机管脚分配原理图

正比,其比例系数  $M$  由高压  $V_{out}$  决定。电离产生的电子中和了阳极上一部分电荷,使阳极电位降低,随后高压电源又通过电阻  $R$  向计数管充电,使阳极电位恢复,由此在阳极上产生一个负的电压脉冲<sup>[3]</sup>。由入射粒子形成的脉冲经过放大整形后送入单片机计数器时钟输入端口完成计数。计数管及放大整形电路如图3所示

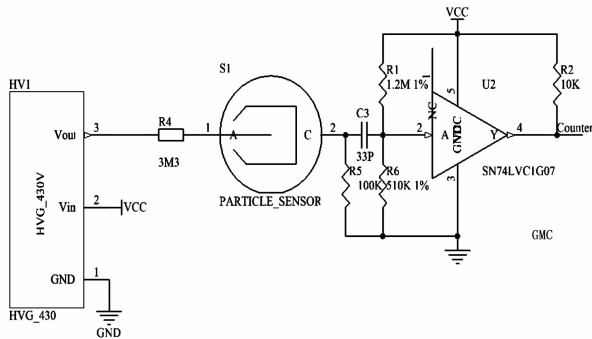


图3 计数管及放大整形电路原理图

### 2.3 蓝牙 BLE 模块

本设计采用的蓝牙 4.0BLE 模块主芯片为 CC2540,功率等级 II 级,典型发射功率 0 dBm,典型接收灵敏度 -88 dB,最大接收灵敏度 -94 dB,板载天线,具有超低功耗、尺寸小巧,性能稳定可靠等优点<sup>[4]</sup>。使用该模块降低了系统的硬件复杂度、体积、功耗和成本,缩短了开发时间和开发难度,其原理如图4所示<sup>[5]</sup>。场效应管 SI2333 由单片机控制,用于开/关蓝牙模块电源,当控制管脚为低电平时为蓝牙模块供电,为高电平时断电;蓝牙模式控制端口接单片机 P3.0,蓝牙链接状态端口 Link 接单片机 P3.1,当蓝牙模块与其它设备建立链接时 P3.1 端口被置为高电平,当蓝牙模块为链接状态时可以通过拉低 P3.0 将其强制工作在 AT 模式下;与单片机通讯的数据通过 UTX, URX 传输。

### 2.4 电源管理电路及低功耗设计

监测仪采用可充电电池供电,并通过 MicroUSB 端口为其充电。电池电压经 1/2 分压后接 A1 端口,用于电量监测。本设计中 ADC 工作在 12 位转换模式,采用单信号通道重复采样,由 TA.out1 提供采样触发脉冲。参考电压为内部 2.5 V 基准电压 VREF+, 转换时钟由 ACLK 提供, 电源及电池监

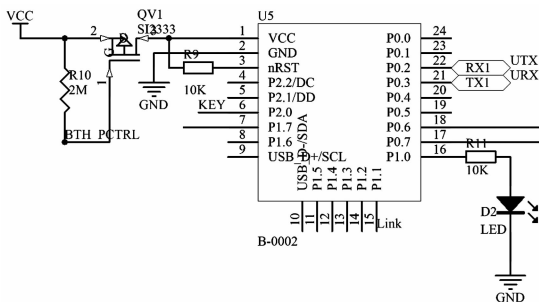


图4 蓝牙模块电路原理图

测电路如图5所示。

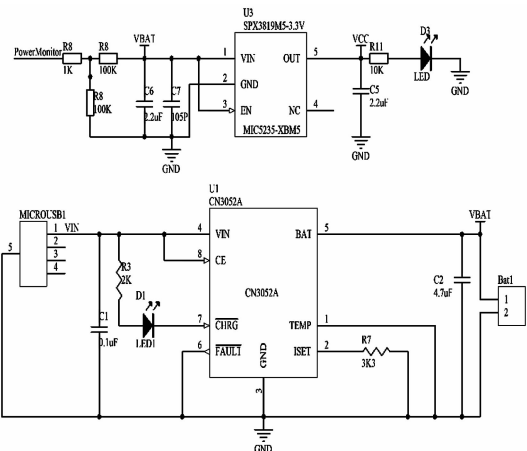


图5 电源及电池监测电路原理图

受外形尺寸约束,对电池的体积与电量有较大限制,频繁的充电会严重影响用户的使用体验,因此这类微型个人监测设备必须采取低功耗设计。各主要模块工作电流如表1所示。

表1 主要模块工作电流

序号	模块名称	工作电流 /mA	待机电流 /mA	说明
1	CPU	0.250 <sup>[2]</sup>	0.001 <sup>[2]</sup>	待机时为 LPM3 低功耗模式
2	ADC12	0.200 <sup>[2]</sup>	很小	工作电流主要为建立内部参考电压时功耗
3	蓝牙	8 <sup>[5]</sup>	0.3	蓝牙关闭电源时,如果 P3.4 管脚设置为 UART0 发送管脚,为了保持高电平的待机状态会造成约 8mA 的电流泄漏。
4	UART0	很小	很小	
5	其他	0.300	0.300	均为静态电流

由表1可见,主要功耗来源于蓝牙、ADC12、CPU 和关闭蓝牙时 UART0 发送管脚的泄漏电流。本设计采用以下设计降低系统功耗。

(1) 单片机采用时间中断和外部事件中断(接收到手机指令)混合作模式,系统初始化完成后立即进入低功耗模式,等待定时器中断或者外部事件中断的唤醒。定时器 A 每秒钟产生一次中断,单片机完成计数读取、时间更新、剂量率计算等任务后再次进入低功耗模式;如果是外部事件(接收到手机指令)中断,则单片机处理完该事件(指令)后进入低功耗模

式。在低功耗模式下，MCLK 和 SMCLK 时钟关闭，仅 ACLK 活动，可以明显降低单片机的功耗。

(2) 监测仪采用间歇广播模式，按照预定的时间间隔广播监测数据。当手机需要向监测仪发送指令时，由手机主动发起链接，并发送数据，监测仪接收到数据后提取指令，执行完后发送命令回执并断开蓝牙链接，随后进入待机模式。经测试，采用正常环境下每 4 秒钟更新一次广播内容，每次广播 10 ms，在高剂量率环境下每秒钟更新一次内容并持续广播的办法，既满足监测的实时性要求，也可以大大降低系统功耗。

(3) 关闭蓝牙模块电源后，将 P3.4 管脚设置为 I/O 管脚，并输出低电平。

(4) 由于系统本身采用了低功耗设计电池电压变化平缓，且 CPU 工作电压范围较宽，故每分钟测量一次电池电压是可以满足电量监测设计要求的。

### 3 软件设计

#### 3.1 主程序设计

单片机主程序流程如图 6 所示。单片完成内部资源设备和软件参数设置的初始后，弱蓝牙处于连接模式，等待接收蓝牙传输的控制指令，并完成相关操作；若处于 AT 模式，将电池状态数据和脉冲计数数据搭载到蓝牙的设备名称中，通过更改设备名称更新广播信息。如果剂量率在安全阈值以下，监测仪每 4 秒钟更新一次计数，广播 10 ms 等待手机端捕获广播内容，或由手机端在必要时发起链接；如果超过阈值则每秒中更新一次计数并持续广播。

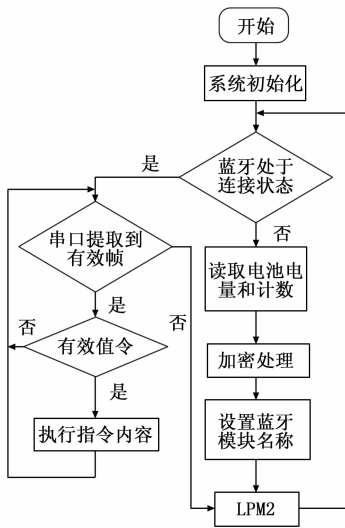


图 6 主程序流程图

#### 3.2 定时/计数器 A 中断程序设计

TA 由 ACKL 提供时钟，每秒钟中断一次。TA 发生中断后单片机被唤醒，读取计数器 B 的计数并清零 TBR 寄存器。鉴于辐射信号的随机性特征，为了消除统计误差，保证低本底条件下每秒钟测得的剂量率依然有效，本设计以 1 分钟为时间周期统计脉冲个数。

中断程序在完成计数统计、系统时间更新等其它操作后清除中断标志位，退出 LPM2 模式，主程序进入下一个循环。

#### 3.3 UART0 收发程序设计

UART0 由 ACLK 提供时钟信号，以帧为单位进行数据接

收和发送，采用中断工作模式，工作流程如图 7~8 所示。

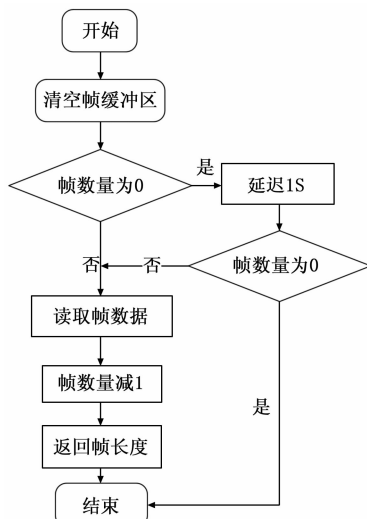


图 7 UART0 接收流程图

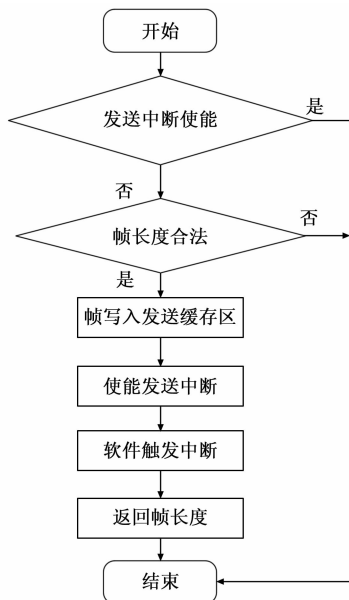


图 8 UART0 发送流程图

发送数据时，数据帧写入发送缓冲区，使能 UART0 发送中断，软件触发发送中断，发送返回写入缓冲区的字节数。触发中断处理函数中，发送缓冲区中的数据逐字节写入发送寄存器，直至帧结束符。帧发送完毕后禁止 UART0 的发送中断。如果发送中断处于使能状态，则表示当前有数据未发送完，发送函数返回 0。

接收数据时，当 UART0 接收中断被触发时，接收寄存器中的字节依次写入 FIFO 接收缓冲区，如果该字节为帧结束符，则对接收帧数量加 1。函数从接收缓冲区读取帧数据时，首先清空帧缓冲区，然后判断帧数量，如果两次判断均为 0 表示没有可用读取的数据，函数返回 0；否则，将接收缓冲区的数据逐字节写入帧缓冲区，直至帧结束符或接收缓冲区结尾。每帧提取结束后对接收帧数量减 1，并返回帧长度<sup>[6]</sup>。

#### 3.4 数据格式

本设计中数据分为监测仪的广播数据和指令/应答数据。

蓝牙模块设备名称最长为 20 个字节, 我们使用了前 15 个字节, 其中前 9 个字节为实际设备名, 用于手机对设备的识别; 随后 2 个字节为电池电量数据, 最后 4 个字节为计数值。

指令帧由手机发送给监测仪, 监测仪执行完指令后将执行结果以应答帧的形式发送给手机, 帧结构如图 9 所示。帧标志位长度 1 字节, 固定取值 0xfd; 命令字占 1 个字节, 标识该指令功能; 数据长度位占 1 字节, 值为帧长度减去 2 (标识位和长度位); 帧数据长度可变但不超过 20 个字节, 主要包括指令所需的参数; 校验位长度为 1 字节, 其值为除去结束符的所有字节依次异或值; 帧结束符为两个连续的 '\r' 和 '\n' 字符。帧命令字定义如表 2 所示。

帧标识	帧命令	数据长度	帧数据	校验位	帧结束
-----	-----	------	-----	-----	-----

图 9 指令数据帧结构

表 2 指令帧主要命令字定义表

序号	指令	命令字
1	设备编号设置	0x01
2	报警阈值设置	0x02
3	时间同步	0x03
4	电池电量查询	0x04

### 4 测试结果与分析

本设计结构紧凑, 尺寸长宽高分别为 80 mm \* 20 mm \* 15 mm (含电池及 G-M 计数管), 图 10 为电路部分与一节 AA 电池的的尺寸对比情况。

剂量计平均功耗约为 2 mA, 使用一颗 400 mAh 的 3.7 V 锂电池可连续工作超过 120 小时。在北京昌平地区室内天然本底辐射环境下测得的脉冲个数约为每分钟 5~6 个, 经换算后得出室内空气吸收剂量率为 56.47~70.62 nGy/h, 处于环保部 2011 年公布的《1983~1990 年全国环境天然放射性水平调查结果》北京地区空气吸收剂量率范围内, 与 70.00 nGy/h 的平均值相近。

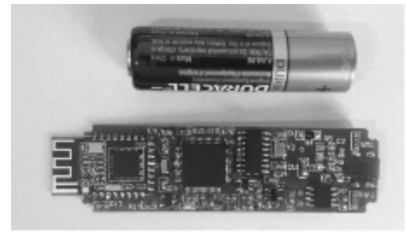


图 10 微型核辐射剂量计尺寸对比图

受计数管探测效率影响, 在天然本底辐射环境下测量值比实际值略低, 其平均值误差约为 9.2%, 小于国标 GB/T 14054-201 规定的由随机涨落产生的 10% 的变异系数。

受计数管探测效率影响, 在天然本底辐射环境下测量值比实际值略低, 其平均值误差约为 9.2%, 小于国标 GB/T 14054-201 规定的由随机涨落产生的 10% 的变异系数。

### 5 结束语

该剂量计硬件结构设计简单、测量实时性好, 具有低成本、便携可靠, 使用灵活等优点。配合手机 APP 既可以单独使用, 也可以多个组网对人体关键部位进行重点监测, 可以有效提高相关专业领域从业人员的个人实时持续防化水平。

#### 参考文献:

- [1] 卢希庭, 江栋兴, 叶沿林. 原子核物理 [M]. 北京: 原子能出版社, 2000.
- [2] Texas Instruments Incorporated. MSP430X1XX Family User's Guide [Z]. Dallas: Texas Instruments, 2006.
- [3] 房宗良. 核电子学 [M]. 北京: 防化学院, 2013.
- [4] 欧阳骏, 陈子龙, 黄宁淋. 蓝牙 4.0BLE 开发完全手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- [5] 深圳市蓝嵌科技有限公司. CC2540/1 蓝牙模块规格书 [Z]. 深圳: 深圳市蓝嵌科技有限公司, 2016.
- [6] 谢楷, 赵建. MSP430 系列单片机系统工程设计与实践 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.

各模块间的参数, 还存在更为复杂的关联, 需要通过进一步在拓展特殊关系为一般关系、分明关系为模糊关系的基础上挖掘数据信息。

#### 参考文献:

- [1] Victor Safronov, Manish Parashar. Optimizing Web Servers Using Page Rank Prefetching for Clustered Accesses [J]. World Wide Web, 2002, 5 (1), 25-40.
- [2] Artiges M. BEA web logic server 8.1 unleashed [M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [3] Nyberg G, Patrick R. Mastering BEA webLogic server [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [4] Okkyung Choi, Sang Yong Han. Personalization of Rule-based Web Services [J]. Sensors, 2008, 8 (4).
- [5] Jiang Guo, Liao Yuehong, Behzad P. A survey of J2EE application perform ancemanagement systems [A]. IEEE Computer Society Proceedings of the IEEE International Conference on University [C]. 2005, 30 (3): 2-54.
- [6] 刘岩, 王正方, 朱云龙. 参数模块和属性约简的应用服务器优化方法 [J]. 小型微型计算机系统, 2010 (3): 441-445.
- [7] 李佳泽, 包文颖, 王长忠. 一般二元关系下的关系决策系统属性约简 [J]. 模糊系统与数学, 2012, 26 (6): 153-158.
- [8] 杜晓昕, 徐慧, 任长伟. 基于粗糙集的属性约简在数据挖掘中的作用 [DB/OL]. 中国科技论文在线, 2006.

可见, 该应用系统当前状态下, 决策属性 D (系统响应时间) 对 R<sub>1</sub> (套接口读取器) 的依赖程度最大, R<sub>1</sub> 为重要参数, 在应用服务器优化时可着重调节。此计算结果较比文献 [6] 更加精准的锁定了影响应用系统响应时间的服务器参数, 在应用服务器优化调节中增提高了工作效率。

### 4 结束语

基于一般二元关系决策系统属性约简模型的应用服务器优化算法改进了已有优化方法缺乏系统性、规律性和易信息流失等弊端, 通过属性约简挖掘出重点参数, 达到有效优化应用服务器的目的。然而在本算法中, 决策关系依然是等价关系, 且属性集与决策集的从属关系也都是分明的, 对于实际系统架构

$$\gamma_{R_1}(D) = \frac{Card(Pos_{R_1}(D))}{Card(U)} = \frac{5}{10}$$

$$\gamma_{R_2}(D) = \frac{Card(Pos_{R_2}(D))}{Card(U)} = \frac{3}{10}$$

$$\gamma_{R_3}(D) = \frac{Card(Pos_{R_3}(D))}{Card(U)} = \frac{2}{10}$$

$$\gamma_{R_5}(D) = \frac{Card(Pos_{R_5}(D))}{Card(U)} = \frac{1}{10}$$