

核聚变装置辐射监控系统研究

柴竹新, 吴宜灿, 黄群英

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要:核聚变装置在放电实验期间会产生高能中子和 γ 射线等辐射, 部分辐射会通过生物屏蔽物透射或天空反散射而到达工作场所或者环境。设计并实现了可用于全范围(近、中、远程三种应用条件)中子和光子辐射、计算机集中监控系统(RMS), 包括对工作场所进行监测的 CAN 系统、基于一种新的 TRP 蓝牙树型拓扑 Ad Hoc 网络的形成机制和路由协议在装置周围区域内移动状态下进行环境辐射监测的无线网络系统、对远程环境进行监测的移动 GPRS 无线网络系统。

关键词:辐射监测; CAN 总线; 蓝牙; Ad hoc 网络; GPRS

中图分类号: TL7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-0918(2005)04-0367-07

A radiation monitoring system for nuclear fusion devices

CHAI Zhu-xin, WU Yi-can, HUANG Qun-ying

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei of Anhui Prov. 230031, China)

Abstract: Fusion device produces high-level neutrons and γ -rays, which would hazard the safety of the public and workers if the doses would be higher than the regulatory limits because of leakage from the bio-shielding and skyshine. It is essential to monitor the radiation doses in the workshop and the environment around fusion devices. A radiation monitoring system (RMS) for full (near and far) areas around a nuclear fusion device has been designed and developed, which can achieve the monitoring and controlling of radiation doses in the workshop area by using the Controller Area Network (CAN), in the institution area by using the Bluetooth Ad hoc network based on a new tree topology formation and routing protocol and in a long range environment by using the General Packet Radio Service (GPRS) network.

Key words: radiation monitoring system; CAN; bluetooth; Ad hoc networks; GPRS

收稿日期: 2005-07-11; 修回日期: 2005-08-25

基金项目: 本研究得到了国家大科学工程项目的支持

作者简介: 柴竹新(1962—), 男, 安徽人, 目前从事托卡马克辐射监控系统研究

托卡马克核聚变装置在正常实验放电期间会产生大量的中子和中子诱导的 γ 射线,尽管大部分辐射将被厚1~2 m的混凝土屏蔽墙屏蔽掉,但仍然会有部分辐射通过直射或天空反散射到达公众并对公众产生危害^[1-2]。因此对工作场所和周围环境辐射剂量进行监测对保障工作人员和公众安全具有重大意义。这种辐射监测客观上要求具有近、中、远程三种应用条件下的计算机集中监控功能。

1) 托卡马克装置周围工作场所(简称为工作场所)的近程辐射监测;

2) 装置所在研究单位区域(简称为所区内)的中程环境辐射监测;

3) 运行单位区域外(简称为所区外)的远程环境辐射监测。

第一种情况工作场所(也可包括生物屏蔽内非工作场所)辐射监测具有分布式的固定监测点、实时性、高可靠性等要求,因而采用先进的CAN(Controller Area Net)总线技术^[3]实现非常合适;对于后两种环境辐射监测系统,由于经常需要移动监测点,加上监测点之间距离较远,采用无需电缆的无线方式将是理想选择。所区内环境监测数据量较大,而所区外远程环境监测通常是抽样性的,数据量较小。针对这两类监测的不同特点,可以采用不同的技术手段实现。

蓝牙(Bluetooth)散射网^[4]具有不需要网络运行费的优点,但由于信息中继传输,通信距离只局限于一个受到限制的范围内;而GPRS(General Packet Radio Service)网络只要在网络覆盖的地方,通信距离几乎可以任意远,但却需要按流量计算网络运行费;这两种通信方式优缺点互补,所以可以采用蓝牙散射网实现所区内的近距离大流量环境辐射监测,而用GPRS网络实现所区外的小流量远程环境辐射监测,这样可以扬长避短,充分发挥这两种无线方案的优点。

先进的现场总线CAN在工业自动化等领域正在得到越来越多的应用,但在世界各国托卡马克核聚变装置的中子和 γ 辐射监测领域尚未得到应用,传统的这类系统通常是基于RS232/RS485/RS422总线的或在此基础上通

过各种协议转换实现其他方式的远程通讯。本文将先进的CAN总线应用于托卡马克装置的中子和 γ 辐射监测领域具有积极的意义。目前最大的国际联合托卡马克装置(聚变堆)ITER的纲领性设计文件已将移动辐射监测系统列入了其未来发展计划^[5],可见移动辐射监测系统也是这一领域的重要发展方向。

参考中科院等离子体物理研究所正在建造的国家大科学工程项目超导托卡马克聚变实验装置EAST辐射监测需求,对前述三种辐射监测方案和相应的辐射监测系统(RMS)进行了设计与研究发展,并在已有托卡马克装置HT-7运行时进行了验证实验。其中第一、三种方案已经物理实现并在HT-7托卡马克装置实验中得到验证,第二种方案则通过了计算机仿真验证。

1 CAN总线中子和 γ 辐射监测系统

工作场所和屏蔽厅内辐射监测具有固定监测点、实时性强、高可靠性、分布范围广等要求,测控信号分布在屏蔽大厅内外、总控室、所区内办公楼,通常分布半径约几百米,需要总线长度几公里。而CAN总线是一种先进的工业现场总线,具有多主工作方式、多信息优先级、非破坏性总线仲裁、报文滤波实现点对点通信、驱动节点数多、短帧结构、速度快、距离远等特点,因而采用CAN总线实现非常合适。

1.1 系统组成与功能

该系统由CAN总线联成一个控制器局域网,其上有多个节点(图1)。其中A节点为中央管理工控机,完成系统网络组态、辐射数据采集、实时数据库管理、Web Server等工作; $B_1 \sim B_n$ 节点完成工作场所和屏蔽厅内等n组中子与伽玛辐射剂量当量检测功能; $C_1 \sim C_m$ 节点完成分布式报警功能;D节点完成辐射安全控制功能,关于这一节点详细功能请见文献^[6]。各节点控制器采用单片机加CAN控制器实现^[7]。

1.2 探测器选择与接口

各国的托卡马克的中子和 γ 辐射监测系统目前绝大部分都是RS232/RS485体系的,探测器接口通常有RS232/RS485接口和模拟信号接口,若要在RS232/RS485接口上转换为

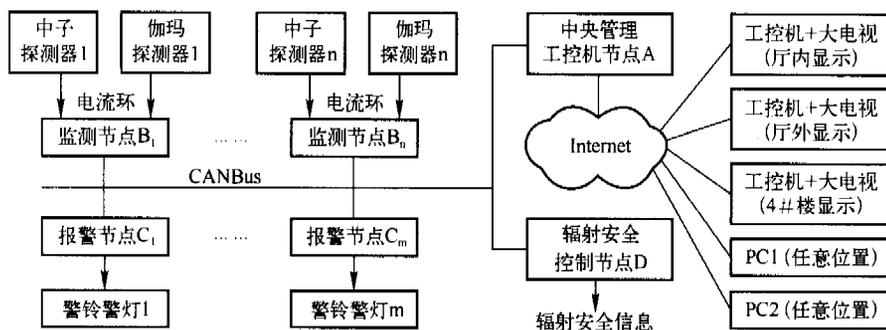


图1 CAN总线辐射监测系统网络结构图
Fig. 1 Network structure of CAN bus RMS

CAN信号,就必须要知道双边协议,这在实际执行中是很困难的;而利用模拟信号接口进行AD转换获取信号,由于中子和 γ 辐射探测器通常达5~8个数量级的超宽量程特性,常规的AD转换会造成很大的误差,也不行;因而本方案采用了计频电流环接口的探测器来精确获取信号。

EAST托卡马克的辐射场是一个中子和光子(γ 和X射线)混合的脉冲辐射场,它们都有很宽的能谱,在反应堆停机后场强很快衰减到本底值;理论计算表明:在装置开机时,中子能谱范围为0.1 eV~2 MeV,而 γ 能谱则在12 MeV以下。开机时,厅内最大中子剂量率为27~386 Sv/h(随空间位置不同)^[1],厅内 γ 剂量率最大是900 μ Sv/h(相应于极限放电时间1 000 s)。厅外中子剂量率为 1.4×10^{-8} Sv/s以下,厅外 γ 剂量率为 5×10^{-9} Sv/s以下。

根据上述参数,探测器可选用高电压电离室型 γ 探测器(EGM和AGM型)和包有慢化体的BF3正比计数管型中子探测器(ENM和ANM型),这两类探测器均含有脉冲频率输出接口,抗电磁干扰性较好,便于后续MCU计数。

1.3 软件组态与设计

中央控制机软件由底层与上层两部分构成,底层软件是CAN卡驱动软件,通过DDE接口与上层软件通讯。上层软件采用力控组态软件,本项目使用了其中的四部分:实时历史数据库软件、工业自动化组态软件、网页浏览软件和远程网络变量服务软件。中央控制机软件主要完成辐射数据采集、处理、存储、显示、辐射安全信息监控、报警、Internet远程信息显示服务等。

1.4 系统应用测试

为了验证系统的有效性,已在HT-7托卡马克装置上利用该辐射监测系统进行了实验验证,在HT-7放电期间使用这套系统对中子和 γ 进行了辐射监测,监测点分别选在屏蔽厅内、控制室和研究所办公室等位置。其中数据每秒采样一次,数据处理采用7 s平均后向平滑滤波,平滑后移间隔为1 s一次。

图2是屏蔽厅内四炮(聚变放电实验脉冲) γ 瞬时剂量率,这四炮的放电时间都是0.66 s,等离子体电流依次分别是127.3、127.3、127.4和127.6 kA,这四炮产生的最大 γ 辐射剂量率分别是:340.2、321.8、324.2和325.3 nSv/s;对应的中子最大辐射剂量率分别为114.1、99.6、121.4和112.1 nSv/s。可见装置运行时屏蔽厅内不论是 γ 还是中子瞬时剂量率都很大,不允许人员进入。图3是上述四炮中第一炮的微观剂量图,从中可见中子只在放电的瞬间产生,即第一秒有中子,仅接着就消失了;而 γ 和中子同时产生,但放电停止后, γ 仍维持十几秒钟才衰减到本底水平。 γ 停机剂量率也是何时允许辐射工作人员进入屏蔽厅内的重要指标。图4是一炮放电时工作场所 γ 和中子的瞬时剂量图,这一炮参数是:放电时间37.14 s,等离子体电流82.0 kA,而测得的 γ 、中子最大辐射剂量率分别为0.22、0.048 nSv/s,它们远低于国家标准,同时 γ 也只维持了十几秒,可见 γ 和中子绝大部分都被屏蔽墙屏蔽掉了,屏蔽效果很显著。图5是工作场所 γ 的小时剂量均值, γ 剂量在0.13 μ Sv/h上下浮动,比平时所测本底剂量0.12 μ Sv/h略有增加;其峰值为

0.15 $\mu\text{Sv/h}$,和这一小时频繁放电有关。它们都远低于国家限制标准 20 $\mu\text{Sv/h}$,因而工作场所是安全的。

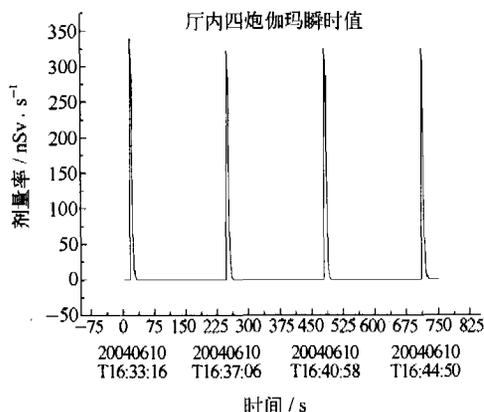


图 2 屏蔽厅内四炮 γ 瞬时剂量率

Fig. 2 γ instantaneous dose rate of 4 discharge pulses in shielding room

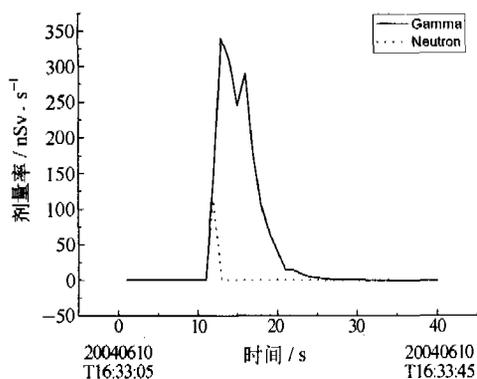


图 3 屏蔽厅内一炮中子和 γ 的瞬时剂量率

Fig. 3 Instantaneous dose rate of neutron and γ of one discharge pulses in shielding room

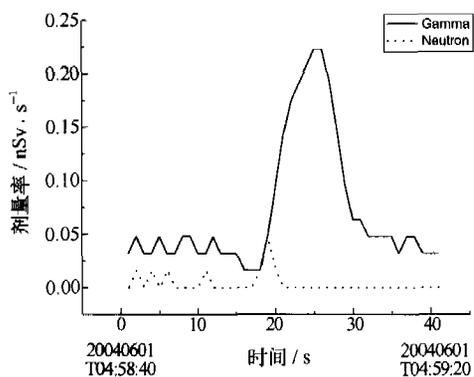


图 4 工作场所一炮中子和伽玛的瞬时剂量率
Fig. 4 Instantaneous dose rate of neutron and γ of one discharge pulses in workshop

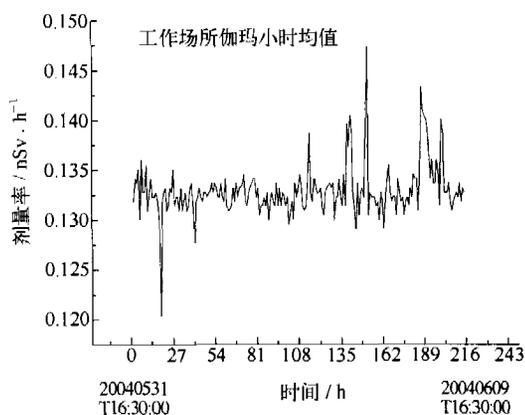


图 5 工作场所 γ 小时剂量均值

Fig. 5 Average dose per hour of neutron and γ of one discharge pulses in workshop

2 蓝牙散射网无线辐射数据采集系统

对所区域内的周围环境进行辐射监测时,监测点通常是在室外,架设电缆极为不便,且监测点会经常移动以评估托卡马克辐射对不同区域的影响。所以采用无线数据传输方式是理想选择。这种监测还有着数据量较大的特点,采用有基站按流量收费的 GPRS 网络显然不经济,点对点电台有发射功率大、体积大的缺点,因而采用先进的无基站、不收费、体积小的移动 Ad Hoc 网络(又名自组网)是很好的选择。

2.1 蓝牙散射网方案的选择

构成 Ad Hoc 网络的无线技术可以有几种选择方案,如 802.11, 蓝牙和 Zigbee 等,但 802.11 构成多跳拓扑类网络协议时,会产生隐藏终端和暴露终端^[8]问题,而 Zigbee 则是一种低速率的 Ad Hoc 网络,在要求大数据量或速度较快的场合蓝牙无疑占有优势,同时蓝牙采用的是跳频通讯,不会产生隐藏终端和暴露终端问题,所以采用蓝牙构成的 Ad Hoc 网络实现托卡马克装置周围近距离区域性移动辐射数据采集是一种很好的选择。

2.2 开发 TRP 协议的必要性

蓝牙散射网是 Ad Hoc 网络的一个特例。但蓝牙协议只给出了散射网的原则定义并没有给出散射网的具体定义,而是留给后人去开发。目前人们已经提出多种蓝牙 Ad Hoc 网络形成

协议^[9-11],其中大部分协议并不适合节点移动场合,并且研究目标都是通用性的点对点的数据传输(典型应用是会议文件传输),而不适合遍历性的数据采集。为满足区域性环境辐射数据采集目的,设计了移动环境下的点对多点数据采集的一种新的蓝牙树型拓扑网络形成和路由协议 TRP(Tree relay protocol)^[12]。

2.3 TRP 协议正常信息处理

TRP 协议规定只采用异步无连接链路(ACL),发射功率采用 CLASS 1。TRP 协议是建立在蓝牙基本协议(RF, LC, LMP)之上的一套应用协议,协议栈见图 6。TRP 协议共设计了 6 个协议数据单元(PDU)分别用于树的生长(建立链路命令 TRP-Build-Link,节点的可生长信息 TRP-Grow-Inf)和数据采集(数采命令 TRP-Acquire-Data,数据与蓝牙地址 TRP-Data-Add,收到响应 TRP-Received-Ans 和寻找下一信源 TRP-Find-Next)。

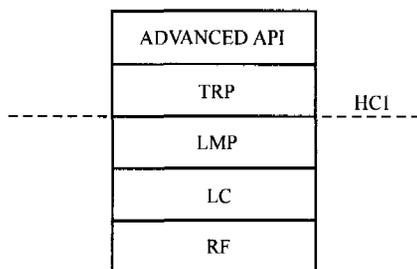


图 6 蓝牙 TRP 协议栈
Fig. 6 Bluetooth protocol stack of TRP

生长周期开始时,数采基站(未来的树根)处于查询态(Inquiry),所有其他未建立链路的节点称为自由节点,处于查询扫描态(Inquiry-Scan)。一旦一个自由节点变成树上的一个节点将不再进入查询扫描态,除非该节点脱离树再次变成自由节点。TRP 网络(图 7)从树根逐级生长,数据采集与网络生长交替进行,即:当第 N 级节点生长完毕后,就进行所有第 N 级节点的数据采集,然后再进入下一级节点的生长。

为了协调 PDU 在网上的流动路线,TRP 协议定义了可生长节点和不可生长节点的概念,PDU 只沿着被标定为可生长节点的路线前进,而可生长节点信息又是随着节点的生长情况或

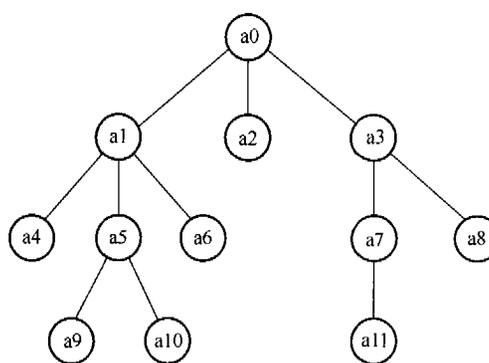


图 7 TRP 树型拓扑网络
Fig. 7 TRP tree topology network

链路中断所导致的路线更新而动态变化的。

2.4 TRP 协议对链路中断的处理

为了适合节点任意移动的情况,任何时间网络上始终都有也只有一种分组(包括控制分组和数据分组)在连续“流动”,若由于节点的移动而导致了信息流的中断,分布式的算法将保证在各种情况下接续中断的信息流,而在下一个周期里通过树的生长更新接纳移动到新位置的节点,并重传丢失的数据。

不论是树的生长阶段还是数据采集阶段,PDU 都要从树根出发经过内部节点顺序遍历叶节点,最终再返回树根,整个过程时序上 PDU 信息流环环相扣,任一节点移出而造成的链路中断都被归纳成两种:桥前中断和桥后中断。分布式算法分别对这两种中断进行了处理,即:任何中断的父子中的父节点都要承担起接续信息流的任务,从而不论在何种情况下与树根相连的树上信息流始终都不会断流;子树一旦脱离树,子树根的 LMP 链路监视器即可监视到,子树根随即断开与其下子节点的链路,这会引发连锁反应,子树根的所有子孙节点最终都变成自由节点,在树的下一个生长周期,它们将再次被树吸纳,重新成为树的一员。整个树通过“链路中断-生长更新”这样不断的重复过程维护了网络的自愈性和自组织性。

2.5 TRP 网络层计算机仿真

论文对 TRP 算法进行了计算机仿真,仿真是建立在这样一个假设下的:“所有的节点都是严格按照蓝牙 LMP 链路管理层之下的蓝牙核心协议执行的”。在这个前提下,本次仿真并不

对 LMP 链路管理层之下的蓝牙核心协议进行仿真,因为蓝牙核心协议已经被蓝牙 SIG 组织证明是有效的和可行的,因此,对建立在蓝牙 LMP 链路管理层之上的 TRP 协议在网络层上的仿真结果即可说明 TRP 协议的有效性。

仿真网络数学模型为:

$$\text{Tree} = \bigcup_i T(a_i), i = 0, 1, \dots, N-1$$

其中:树 Tree 是 N 个子树 $T(a_i)$ 的集合, a_i 是树上 N 个节点的蓝牙设备地址 (BD-ADDR), $T(a_i)$ 是以 a_i 为子树根的子树,其表达式为:

$$T(a_i) = \{a_i, \text{data}, k, b_1, b_2, \dots, b_k\}$$

其中: data 是 a_i 上要采集的数据, k 是 a_i 下的子节点个数, b_1, b_2, \dots, b_k 是 a_i 下的 k 个子节点蓝牙设备地址。当 a_i 是叶节点时, $k=0$, 对于这种特例,子树表达为:

$$T(a_i) = \{a_i, \text{data}, 0\}$$

根据上述数学模型,编制了仿真程序,仿真结果证明了 TRP 算法收敛,完全达到了预计的设计目标,因而 TRP 算法用于上述辐射数据采集系统是可行的。

3 GPRS 远程无线辐射数据采集系统

所区外的远程环境辐射监测具有抽样性数采、数据流量小、距离远等特点,而 GPRS 网络按流量收费、覆盖范围几乎可以任意远(和蓝牙相反)。所以采用 GPRS 网络实现远程无线辐射数据采集是比较合适的。另外,GPRS 还有接入时间短、传输速率高、实时在线等优点。

3.1 GPRS 辐射数据采集系统构成

GPRS 辐射数据采集系统及其信息通道由辐射数据采集单元、GPRS-DTU(无线通信控制终端)、GSM/GPRS 网络、GPRS 支持节点网关(GGSN)、Internet 网络和工控机数据中心等几部分构成,如图 8 所示。GPRS 辐射数据采集系统的原理是:辐射数据采集单元首先采集到中子和伽玛辐射剂量率数据,通过 PC104CPU 模块并经过 RS232 接口送入 GPRS-DTU, GPRS-DTU 无线通信控制终端将数据打包成 TCP/IP 数据包,再转换成 GPRS 数据包,并通过无线链路传送到 MDEC(无线数据交换中心)。MDEC 再剥离 GPRS

数据包并通过 GPRS 支持节点网关(GGSN)将 TCP/IP 数据包传送到 Internet,再由此传送到工控机数据中心。

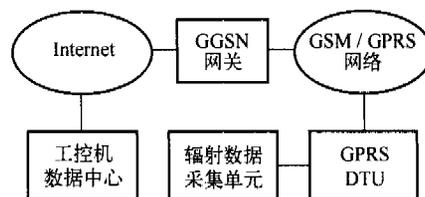


图 8 GPRS 远程辐射数据采集系统框图
Fig. 8 GPRS long-range radiation measurement system structure

3.2 系统软硬件集成实现

GPRS 辐射数据采集与传输单元由中子和 γ 辐射探测器、USB7503 光隔离脉冲计数测频模块、PCM-3370 PC/104 + CPU 模块和 GPRS-DTU H7118 数据终端单元等硬件部分实现(见图 9), USB7503 模块含有 6 路光电隔离的计数测频通道,利用其中的两通道分别对中子和 γ 辐射探测器的脉冲信号计频,获取原始辐射数据后通过 USB 口传给 PCM-3370, PCM-3370 是体积小、能耗少的 PC/104 CPU 模块,原始辐射数据在 PCM-3370 里被乘以各自辐射探测器的剂量比率因子,从而获得辐射剂量率。PCM-3370 再将剂量率数据通过 GPRS-DTU 发送出去。GPRS-DTU H7118 是 GPRS 数据终端,它支持双频 GSM/GPRS,内置 TCP/IP 协议,符合欧洲电信标准协会 ETSI GSM Phase 2+ 标准,支持 RS-232/485 串口数据透明传输,采用超级终端对 DTU 的参数进行配置,参数配置时的波特率取为 57 600 baud,而通讯时的波特率则取为 9 600 baud。

在作为数据中心的工控机一侧,由于工控机数据中心实际上是通过局域网接入 Internet 的,所以工控机的 IP 地址经过局域网的路由器进行了端口映射,从而在公网上可以识别工控机数据中心。在工控机上也同样运行力控组态软件,组态软件调用了 GPRS 驱动程序,将通过 Internet 的通讯虚拟成串口的通讯,将 GPRS 网关虚拟成通过串口的一个 I/O 设备,并对 GPRS 网关进行终端 ID 号、端口号和更新周期等参数设置。

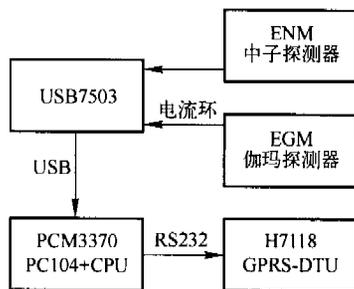


图9 GPRS辐射数据采集与传输单元
Fig. 9 The unit of GPRS radiation data acquisition and transport

最后在 PCM-3370 和工控机上,分别采用组态软件的脚本语言在两机上编制了数据采集、平滑滤波、显示、记录等程序。实验中,系统通讯正常,远程辐射数据完整准确地 在工控机上显示和被记录下来。

4 总结

将托卡马克装置的辐射监测系统分为近、中、远程三种子系统并分别进行了设计,同时对第一、三种方案进行了物理实验,对第二种方案进行了计算机仿真验证。

采用 CAN 实现的工作场所辐射监测系统充分利用了 CAN 的优点,从而使得这一系统具有安装灵活简单、易于冗余设计、多主协议、实时性强和高可靠性等优点。

提出了一种新的 TRP 蓝牙树型拓扑 Ad Hoc 网络的形成机制和路由协议,目的是实现装置所在研究所区域内移动状态下的环境辐射监测网络。TRP 算法提出了可生长节点和不可生长节点、桥前中断和桥后中断等一些全新概念,前者概念的提出使得 PDU 在树上可以随着网络结构的变化而动态流动;后者使得当无线链路中断时 TRP 的网络能够重新构建。与已有的几种蓝牙多跳拓扑类协议不同的是,TRP 是专为点到多点的遍历数据采集设计的,能适应移动环境下的网络拓扑结构动态变化,具有网络的自组织性和自愈性。TRP 虽是专门设计的,但技术和方法同样适用于类似使用环境下的其他系统。

对 GPRS 辐射数采系统的软硬件集成进行了设计并进行了实现,实验中远程数据完整地传输到了数据中心。GPRS 系统具有体

积小、移动便捷、距离远、数据中心网上接收灵活等特点,对于保障公众的辐射安全、积累辐射安全数据具有重要意义。所依赖的设计思想和技术也适合于其他类似装置辐射监测。

5 致谢

本文工作过程中得到了国家大科学工程 EAST 辐射安全项目组成员和 HT-7 实验运行组成员的多方位支持,特此致谢。

参考文献:

- [1] 黄群英,陈朝斌,吴宜灿. 核聚变实验装置 HT-7U 一维及二维辐射防护设计研究[J],核科学与工程,2001,21(1):79-85.
- [2] 陈义学,吴宜灿,黄群英,等. 核聚变实验装置 HT-7U 停机辐射剂量率三维计算与分析[J],核科学与工程,2004,24(1):49-55.
- [3] ISO 91898 Vehicle -Digital Information Interchange - High Speed Communication Controller Area Network,1993/11.
- [4] Bluetooth SIG, Specification of the Bluetooth System - Version 1.1 B, Specification Volume 1 & 2, 2001.
- [5] Radiological and Environmental Monitoring Systems, ITER G A0 GDRD 3 01-07-19 R1.0, Design Requirements and Guidelines Level 2, Chapter 22; 1-13.
- [6] 柴竹新,吴宜灿,刘伯学. EAST 核聚变装置高可靠性辐射防护电子控制系统[J]. 核电子学与探测技术,2005,25(1):28-31.
- [7] Chai Zhuxin, Huang Qunying, Wu Yican, et al. An integrative radiation protection control system based on a CAN bus for the HT-7U tokamak fusion device[J]. Journal of Radiological Protection,2004,24(2):147-153.
- [8] 王金龙,王呈贵,吴启晖. Ad Hoc 移动无线网络[M]. 北京:国防工业出版社,2004:2-3.
- [9] Liu Yong, Lee M J, Saadawi T N. A Bluetooth Scatternet-Route Structure for Multihop Ad Hoc Networks [Z]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21(2):229-239.
- [10] Zaruba G V, Basagni S, Chlamtac L. Bluetrees-scatternet formation to enable Bluetooth-based Ad hoc networks[Z]. IEEE International Conference on Communication,2001,1:273-277.
- [11] Pereoli C, Basagni S, Chlamtac I. Configuring Bluetooth; Multihop Scatternet Formation for Bluetooth Networks[Z]. IEEE Transactions on Computers, Special Issue on Wireless Internet, 2002.
- [12] 柴竹新,吴宜灿,刘晓平. 蓝牙树型拓扑网络接力数据采集协议[Z]. 中国电子与信息工程学术年会,2004:601-607.