

# 用于大规模实时连续监测的 WSN 多信道基站设计\*

王子龙, 袁慎芳, 胡步青, 宋 帅

(南京航空航天大学智能材料与结构航空科技重点实验室 南京, 210016)

**摘要** 针对无线传感器网络大规模实时连续监测应用中存在的庞大数据传输困难、实时性不足等问题,提出了一种由单基站同时并行接收多个信道数据的网络结构,并设计了能够同时并行接收多信道数据的多信道基站节点。基站设计以 FPGA 作为核心,控制多个射频模块并行工作在不同信道,控制 USB2.0 总线实时连续传输数据给监控中心,实现大规模实时连续监测。通过搭建多信道无线传感器网络实时连续监测系统,验证了多信道基站节点的功能。

**关键词** 无线传感器网络;多信道基站;大规模实时连续监测;节点设计

**中图分类号** TP393; TH87

## 引 言

基于无线传感器网络(wireless sensor network, 简称 WSN)的大规模实时连续监测方法已成为国内外研究的热点<sup>[1]</sup>,覆盖领域包括车辆监控<sup>[2]</sup>、工业监测<sup>[3-4]</sup>、生态环境监测<sup>[5]</sup>及结构健康监测<sup>[6]</sup>等。例如,在 2025 年全面投入使用的“美国国家智能交通系统项目规划”<sup>[7]</sup>将通过大规模无线传感器网络进行实时连续监测,实现车辆的高效及安全运行。Crossbow, TI, EnOcean GmbH, MicroStrain 等大型公司都在积极开发相关产品,力图在该领域为用户提供 WSN 的解决方案。由于大规模实时连续监测中数据量庞大、传输实时性高等特点,对 WSN 技术提出更高要求<sup>[8-9]</sup>。WSN 软件协议大多以能源效率和网络自适应自组织为研究重点<sup>[10]</sup>,如能量多路径路由机制、LMAC 协议等,不适用于大规模实时连续监测应用;常用无线节点如 Micaz, te-losb 及 Imote 等,均为单控制芯片单射频结构,不能同时处理多个信道内数据,实时性不足,数据容量受限于 IEEE 802.15.4 协议规定的 250 kbps。

为实现大规模实时连续监测,国内外许多科研机构在已有技术基础上进行了大量研究。软件协议方面,土耳其海峡大学 Ozlem Durmaz Incel 等在单信道 LMAC 协议的基础上提出了 MC-LMAC 多信道协议,提高了无线传感器网络的数据容量<sup>[9]</sup>。美

国加州大学的 Hoi-Sheung 等提出 McMac 协议,改善了数据传输的实时性<sup>[11]</sup>。但多信道协议不能解决节点单射频结构带来的限制,多个信道传输的数据仍需由基站分时依次接收;大多数多信道协议需要节点以较高频率发送信标帧控制信道,占用数据帧的发送时隙,加大了数据容量的负担<sup>[12]</sup>。组网技术方面,伊利诺伊大学香槟分校的 B. F. Spencer 等在韩国 JINDO 大桥进行了桥梁强度测试实验<sup>[13]</sup>,将大量节点分布在两个信道内,由两个基站分别接收。此外也有将大量节点布置在两个或以上信道中的研究<sup>[14]</sup>,监控中心和基站数量随信道数量增加而增加。使用上述组网方式所搭建的多信道多基站网络架构主要存在以下问题:a. 监控中心需为每个基站节点提供独立的串口,对监控中心提出更多要求;信道数量多时,系统搭建复杂。b. 每个基站节点都含有独立的射频模块及单片机模块,基站节点数量多时系统成本提高。c. 如采用多个监控中心分摊基站节点,需要对多个监控中心的数据进行汇总,增加数据处理的时间,降低监测的实时性。

针对上述研究中存在的问题,笔者提出了多信道单基站网络结构,并设计该网络的核心无线传感器网络多信道基站节点。网络理论上可同时并行接收 IEEE 802.15.4 协议规定的 15 个信道数据(保留一个信道用作同步信道),网络数据传输速率最高可

\* 国家自然科学基金资助项目(50830201);长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0968)

收稿日期:2011-05-30;修改稿收到日期:2011-09-05

为  $250 \text{ kbps} \times 15 = 3.75 \text{ Mbps}$ , 可以提供更高的网络数据容量; 每个信道内均采用时分多址接入 (time division multiple access, 简称 TDMA) 机制。多信道基站节点主要由单个 FPGA 芯片和多个射频模块组成。应用 FPGA 的高速并行功能, 同步并行接收多个数据信道内的采样数据, 提供更高的网络数据容量; 采用数据标准化封装高速缓存机制, 解决使用多个基站时监控中心处理数据会遇到的问题; 控制单个 USB2.0 总线完成与监控中心高速实时连续数据传输, 避免采用多个基站对监控中心的要求。

## 1 多信道单基站网络结构

大规模实时连续监测系统中采集通道数目多, 各通道需保持采集时刻同步, 数据需实时连续传输给监控中心。为解决大规模实时连续监测的难点, 可采用本文提出的基于 IEEE802.15.4 标准<sup>[15]</sup> 的多信道单基站网络结构。如图 1 所示, 在网络中将所有采集节点分布在多个信道中, 同步采集后每个信道内的节点按照各自信道内划分的发送时隙向多信道基站节点发送数据。不同信道中的数据不会产生碰撞, 网络中同时有多个信道进行数据传输, 网络数据传输速率由原来单个信道的 250 kbps 倍增; 当使用 IEEE802.15.4 规定的 15 个信道时 (保留一个信道用作同步信道), 网络瞬时数据传输速率可以达到 3.75 Mbps。因此可以提供更高的网络数据容量。

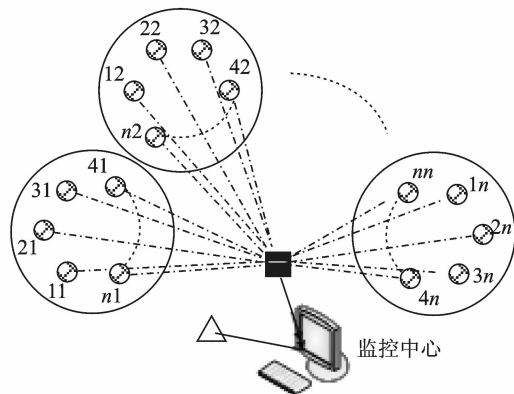


图 1 多信道单基站无线传感器网络结构

○ (图中大圆) 信道; ■ 多信道基站节点; ---- 无线路由  
 ⊗ 传感器节点; → 串口; △ 管理节点; → USB2.0

## 2 多信道基站节点设计

多信道基站节点为实现多信道单基站网络结构

的核心, 需要具有高速并行接收多个信道内大量数据的能力。设计中应用了 FPGA 的高速并行工作能力, 控制多个射频模块实时连续并行接收多个信道中的数据包, 采用高级数据链路控制 (High-level data link control, 简称 HDLC) 封装、循环冗余码校验 (cyclical redundancy check, 简称 CRC), 等机制高速处理所接收的数据包, 并通过 USB2.0 端口将数据流高速实时地上传给监控中心。

### 2.1 节点硬件设计

多信道基站节点的硬件结构如图 2 所示。其硬件结构包括多个独立的射频模块、FPGA 芯片、USB 芯片、E2PROM 芯片、电源管理模块、时钟模块及各芯片的周边电路。

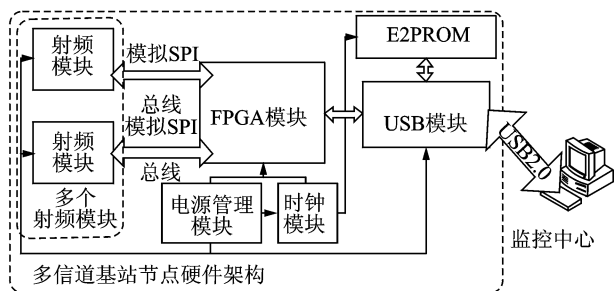


图 2 多信道基站节点硬件结构

FPGA 模块选型主要考虑以下几点: (1) 满足可用 I/O 引脚需求; (2) 支持工作晶振频率高; (3) 芯片体积小。本设计选用了 ALTERA 公司 Cyclone II 系列 EP2C5Q208C8N 芯片。射频模块选用 TI 公司的 CC2420 射频模块。针对单个 CC2420 模块, FPGA 芯片使用 4 个可用 I/O 引脚接收 CC2420 的工作状态, 并使用另外 4 个可用 I/O 引脚模拟 SPI 接口与 CC2420 进行数据交换、命令发送以及访问 CC2420 内部寄存器和存储区等操作。USB2.0 芯片选用 CYPRESS 公司的 EZ-USB FX2 CY7C68013。芯片以 Slave FIFO 模式工作, 此时 FPGA 芯片可像操作普通先入先出队列 (First input first output, FIFO) 一样对 CY7C68013 芯片的缓冲 FIFO 进行读写操作。

### 2.2 节点软件设计

多信道基站节点的软件结构如图 3 所示。该结构从下至上经过无线接收层、数据处理缓存层、逻辑控制层及数据通信层。数据处理缓存层含数据处理和数据存储单元, 逻辑控制层含逻辑控制单元。

节点的工作流程如图 4(a, b) 所示。数据处理单元包括射频模块管理状态机和数据包处理状态

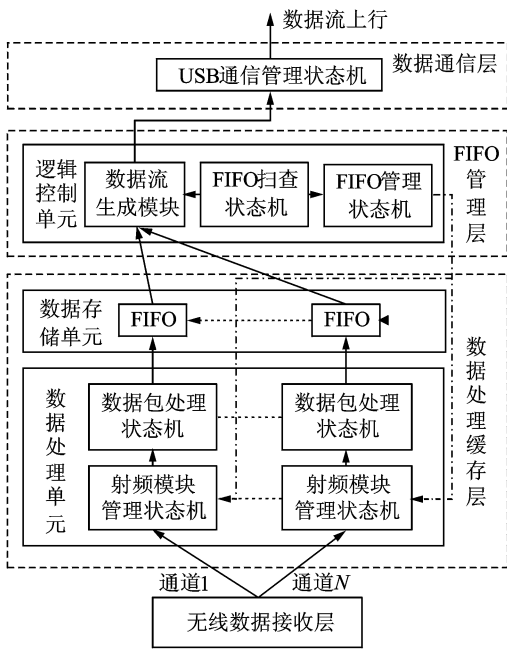


图3 多信道基站节点软件结构

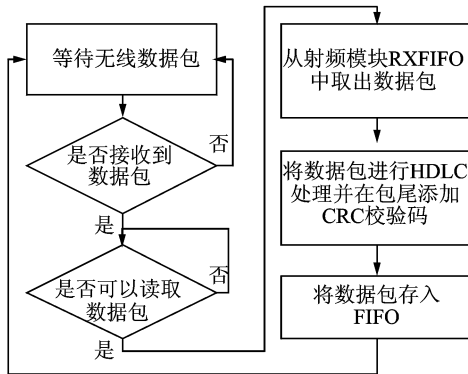
块。数据包处理状态机的主要功能有：a. 按照HDLC协议处理读取的数据包；b. 在数据包尾部增加CRC校验码，用于监控中心的数据传输正确性校验；c. 将处理完的数据包存入数据存储单元中相应的FIFO。数据存储单元由FPGA内部构建多个FIFO组成。每个数据通道包含一个FIFO，用来缓存该通道接收并处理过的数据包。FIFO的读使能受逻辑控制单元控制，写使能同时受数据处理单元和逻辑控制单元控制。当逻辑控制单元从FIFO中读取数据时，关闭FIFO的写使能，直到FIFO内的数据被完全移出。逻辑控制单元包括FIFO扫描状态机、FIFO管理状态机和数据流生成模块。FIFO扫描状态机不断依次扫描所有通道内FIFO的空满情况，FIFO管理状态机根据扫描结果，对FIFO进行控制。

### 3 实验验证

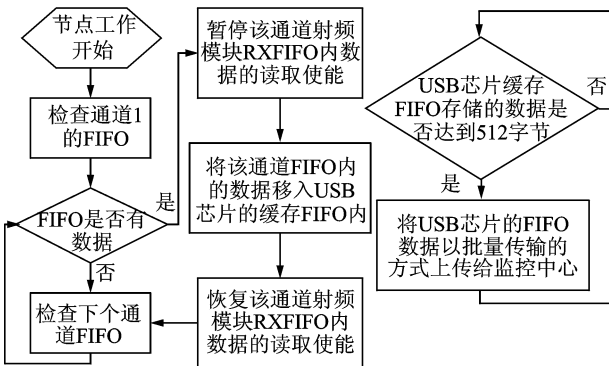
#### 3.1 实验系统搭建

实验系统如图5所示，由悬臂梁、砝码、15个传感器节点、笔记本电脑(监控中心)及多信道基站节点组成。悬臂梁采用尾端托盘添加砝码的方式加载，应变片布置情况如图6所示。每个传感器节点含4路10位采样通道，每采集一次产生8个字节数据，采样频率为32 Hz，数据采样率为2.048 kbps。采集8次生成一个大小为87字节的数据包，数据发送频率为4 Hz。单个节点的理论吞吐量为 $4 \times 87 \times 8 = 2.784$  kbps，整个监测网络理论网络数据容量为 $15 \times 2.784 = 41.76$  kbps。网络采用管理节点定时发送同步命令包的方法进行同步，在同步过程中，管理节点会依次在所有使用的信道中发送一次同步命令包。根据信道的先后次序，同步时间间隔会扣除先后次序带来的延迟。

图6中标注1(2)等的长方形为应变片及其编号，括号内数字代表另一面对称布置的应变片的编号。悬臂梁上共粘贴32片应变片，1~28号应变片分别对应14个节点的两路通道，29~32号应变片



(a) 单通道数据接收及存储工作流程



(b) 多信道基站节点数据上传的工作流程

图4 多信道基站节点工作流程

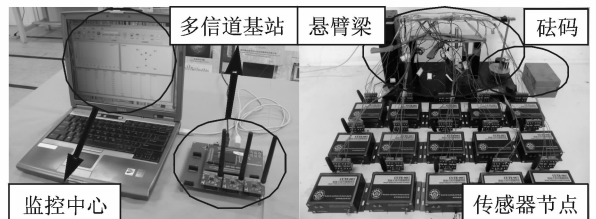


图5 分簇无线传感器网络实时连续监测系统

机。射频模块管理状态机主要功能有：a. 上电初始化射频模块；b. 响应射频模块接收到数据后发出的中断信号，读取数据包；c. 状态异常时复位射频模

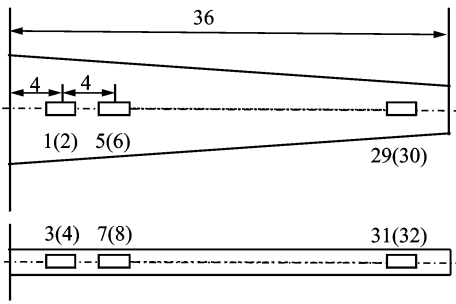


图 6 悬臂梁应变片布置方式(单位:cm)

对应 1 个节点的一路通道。

### 3.2 单信道网络实验

配置所有传感器节点在同一信道中,采用 TD-MA 机制分配节点发送时隙。实验过程中保持悬臂梁砝码重量不变,分别使 1~15 个节点处于工作状态,进行多组实验,测试单信道网络能实现的实际网络数据容量,结果如图 7 所示。当单信道网络中包含 9 个以上节点时,可能由于节点获得的发送时隙过小导致数据包冲突加剧等原因,网络实际达到的数据容量低于理论值,随着节点数量进一步增多,差距逐渐增大。当节点数量达到 15 个时,网络数据容量为 37.77 kbps,比数据完整传输所需理论网络数据容量少 3.99 kbps,不能满足监测网络需求。

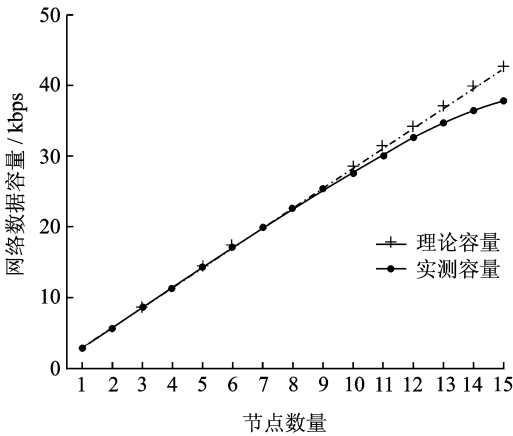


图 7 单信道网络数据容量随节点数量改变的变化关系

### 3.3 多信道单基站网络实验

为验证多信道单基站网络提高网络数据容量的能力,进行多信道单基站网络实验,考虑网络数据量最大的极限情况,即使用所有的 15 个节点。将 15 个传感器节点平均配置在 11,13 和 15 信道中。进行 15 h 的长时间实验,在测量网络数据容量的同时,考察网络长时间工作的可靠性。实验过程中大部分时间保持载荷不变,可随时通过改变砝码质量验证应变监测的实时性。

实验得到单个信道及网络整体的数据容量,如表 1 所示。监控中心的上位机中根据整个实验过程中接收到的数据总和,得到单个信道的网络数据容量,并计算出整个监测网络的数据容量。表 2 为 15 个节点同时工作时,单信道网络实验、多信道单基站网络实验及理论值的对比。由表 2 可知,多信道单基站网络实验结果与理论网络数据容量相符,验证了采用多信道基站节点搭建的多信道单基站网络实现实时监测的能力。与单信道网络实验结果相比,多信道单基站网络提供了更多的网络数据容量,使大规模实时监测的实现更为可行。

表 1 多信道基站节点数据接收功能试验数据表

信道	数据量/kbps
11	13.919
13	13.918
15	13.918
总和	41.755

表 2 单信道网络、多信道单基站网络及理论值对比

网络类别	工作节点数量	数据量/kbps
单信道网络	15	37.77
多信道单基站网络	15	41.76
理论结果	15	41.76

图 8 显示在一个时间段内不断添加砝码对悬臂梁施加变化载荷,实时连续获取的应变片应变值的变化曲线。两条曲线分别为一个节点的两个通道采集到的 17,18 号应变片应变值的实时数据,验证了应用多信道基站节点的无线传感器网络监测系统的实时连续监测功能。

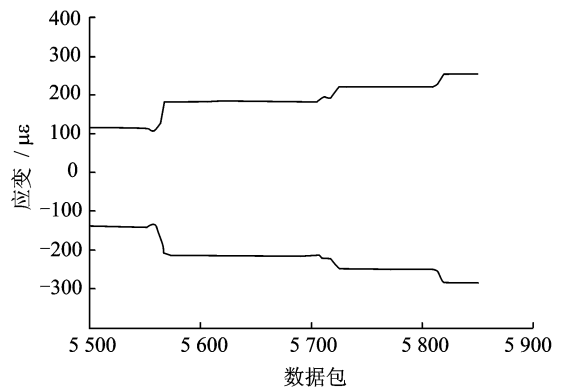


图 8 随载荷变化实时连续获取的应变值

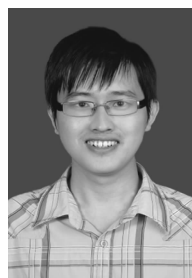
## 4 结束语

提出了一种多信道单基站无线传感器网络,主

要工作包括:a.提出了多信道单基站的无线传感器网络大规模实时监测实现方法,设计了多信道基站节点;b.具体分析了多信道单基站网络的结构和多信道基站节点的软硬件结构,采用FPGA实现了多个CC2420射频模块的并行工作和高速缓存机制,采用USB2.0总线实现了数据的高速上传;c.验证了多信道单基站网络提高网络实际数据容量的能力,及多信道基站节点实时并行接收多个信道数据的功能。实验结果表明,多信道单基站网络可以实现多个信道的并行数据采集传输,是提高网络数据容量、实现大规模实时监测的可行方法,能够保证数据接收的可靠性和实时性。

### 参 考 文 献

- [1] 朱红松,孙利民.无线传感器网络技术发展现状[J].中兴通讯技术,2009,15(5):1-5,15.  
Zhu Hongsong, Sun Limin. Development status of wireless sensor network [J]. ZTE Communications, 2009,15(5):1-5,15. (in Chinese)
- [2] Wu Zhizhou, Chu Hao, Pan Yuqi, et al. Bus priority control system based on wireless sensor network (WSN) and Zigbee [C]//Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety. Shanghai, China; [s. n.], 2006:148-151.
- [3] 周公博,朱真才,陈光柱.基于传感器网络的瓦斯传感器故障诊断[J].振动、测试与诊断,2010,30(1):23-27. (in Chinese)  
Zhou Gongbo, Zhu Zhencai, Chen Guangzhu. Fault diagnosis of gas sensor based on wireless sensor network[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(1):23-27. (in Chinese)
- [4] 汤宝平,贺超,曹小佳.面向机械振动监测的无线传感器网络结构[J].振动、测试与诊断,2010,30(4):357-361. (in Chinese)  
Tang Baoping, He Chao, Cao Xiaojia. Topology of wireless sensor networks for mechanical vibration monitoring[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(4):357-361. (in Chinese)
- [5] Zerger A, Rossel R A V, Swain D L, et al. Environmental sensor networks for vegetation, animal and soil sciences[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2010, 12(5):88-97.
- [6] Wu Jian, Yuan Shenfang. Multi-agent system design and evaluation for collaborative wireless sensor network in large structure health monitoring[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(3):2028-2036.
- [7] Turner S. Guidelines for developing ITS data archiving Systems[R]. Report No. 2127-3, Texas: The Texas Department of Transportation in Cooperation with the U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2001.
- [8] Wang Feng, Gao Jianhua. Behavior monitoring framework in large-scale wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 29th IEEE International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC' 2010). New Mexico, USA: IEEE,2010:138-145.
- [9] Ozlem D I, Lodewijk van H, Pierre Jansen, et al. MC-LMAC: a multi-channel MAC protocol for wireless sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2011, 9: 73-94.
- [10] Demirkol I, Ersoy C, Alagoz F, Mac protocols for wireless sensor networks: a survey[J]. IEEE Communications Magazine, 2006, 44 (4):115-121.
- [11] Hoi-Sheung W S, Jean W, Jeonghoon M, et al. McMAC: A parallel rendezvous multi-channel MAC protocol[C]//Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC' 07). Hong Kong, China:IEEE, 2007:334-339.
- [12] Carlene E A C, Kok-Keong L, Orhan G, et al. Multi-channel distributed coordinated function over single radio in wireless sensor networks[J]. Sensors, 2011, 11:964-991.
- [13] Jang S, Jo H, Cho S, et al. Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using smart sensor technology: deployment and evaluation[J]. Smart Structures and Systems, 2010,6(56):439-459.
- [14] 王洋,袁慎芳,董晨华.一种无线传感器网络分布式连续数据采集系统的同步方法[J].东南大学学报:自然科学版,2011,41(1):25-30.  
Wang Yang, Yuan Shenfang, Dong Chenhua. Synchronous method of wireless sensor network for distributed continuous data acquisition system[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2011,41(1):25-30. (in Chinese)
- [15] Cunha A, Koubââ A, Severino R, et al. Open-ZB: an open-source implementation of the IEEE 802.15.4/ZigBee protocol stack on Tiny OS[C]//Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS' 07). Pisa, Italy: IEEE, 2007:1-12.



第一作者简介:王子龙,男,1988年3月生,助理工程师。主要研究方向为无线传感器网络。

E-mail:wzl\_job@yahoo.com.cn

