

基于仿生硬件的无线传感器 网络节点自修复方法

童瑶^{1,2} 袁慎芳^{1,2} 邱雷^{1,2} 张炳良^{1,2}

摘要

针对现有无线传感器网络节点硬件固定,不能重新配置的问题,设计了一种全新的基于仿生硬件的无线传感器网络节点自修复方法,采用仿生硬件实现动态可重构无线传感器网络节点,以使节点能够自主地、动态地改变自身的结构和行为,在其部分硬件失效情况下进行节点的仿生自修复.该研究提出了相关节点的仿生自修复方法,研制了基于现场可编程阵列的仿生自修复节点,并通过实验验证了节点的自修复能力.对于提高无线传感器网络的鲁棒性和安全性具有重要意义.

关键词

无线传感器网络节点;仿生硬件;现场可编程模拟阵列(FPAAs);自修复节点;动态重构技术

中图分类号 TP393

文献标志码 A

收稿日期 2010-08-24

资助项目 国家自然科学基金重点资助项目(50830201);长江学者和创新团队发展计划资助(IRT0968);国家自然科学基金(60772072)

作者简介

童瑶,女,硕士生,研究方向为仿生自修复无线传感器网络. tongyao@nuaa.edu.cn

袁慎芳(通信作者),女,教授,博士生导师,主要研究结构健康监测、无线传感器网络等. ysf@nuaa.edu.cn

0 引言

近年来,微机电系统、无线通信、嵌入式计算、分布式信息处理和人工智能等学科的飞速发展孕育了一种全新的智能测控网络——智能无线传感网络(Wireless Sensor Networks, WSNs),作为物联网的核心研究内容,其重要性及应用前景已被广泛认同. WSNs 具有快速部署、自组织成网、较强的抗毁和协同工作能力等优点,可广泛应用于军事、环境监测、交通管制、无线医疗、结构健康监测等领域^[1-5].

WSNs 的一大特点是节点密集、数量大,其节点数量可能达到几百、几千甚至更多. WSNs 节点一般会被长时间部署在很广泛的地理区域内,在网络使用时存在以下安全隐患:1)由于节点本身电量有限,且工作在恶劣环境中,有可能造成节点失效;2)传感节点通常部署在无人维护的环境当中,因而每个节点都是一个潜在的被攻击点,都能被攻击者进行物理和逻辑攻击;3)在很多应用环境中,对传感器网络系统的维护十分困难甚至不可维护.

在已有的研究中,无线传感器网络节点的硬件都是固定的,除非将节点从传感器网络中移开并且重新设计节点的软硬件系统,否则节点不能重新配置.因此,一旦网络布置完毕就再也不能改变配置,节点无法在失效时进行自修复和自重构.在网络节点失效时,目前的方法主要是舍弃失效节点,这将带来不必要的浪费.自重构和自修复功能在生物界是普遍存在的,如果无线传感器网络从网络节点到网络结构都具有类似生物所具有的自重构和自修复功能,则对于提高无线传感器网络的鲁棒性和安全性意义重大.

仿生自修复无线传感器网络的研究在国外还属于起步阶段,发表的文献较少,大多是针对网络重构,主要讨论网络构架、协议、检测算法等^[6].2006年第1届NASA/ESA自适应硬件和系统研讨会上,英国学者Yang等^[7]报告了由英国4所大学同美国宇航局喷气推进实验室等机构正合作进行研究的ESPACENET项目的研究规划,该项目旨在为航天小卫星研究一种进化型可重构仿生无线传感器网络.同年,德国学者Dressler^[8]讨论了仿生技术应用于无线传感器网络及传感器/驱动器网络的优点.2009年,南京航空航天大学发表了基于冗余模块的一种可仿生自修复的无线传感器网络节点实现方法^[9],它是

1 南京航空航天大学 航空宇航学院,南京,210016

2 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

本文的前期研究进展. 尚未见到其他有关无线传感器网络节点自修复、自重构的报道.

仿生硬件技术的研究也已经开展了 10 年以上^[10]. 其基本思想是采用 FPGAs (Field Programmable Gate Arrays) 和 FPAA (Field Programmable Analog Arrays) 等可编程重构器件模仿生物进化机制实现仿生进化硬件电路. FPGAs 和 FPAA 分别用于实现数字电路和模拟电路的自重构, 它们内部的硬件结构可通过软件进行自重构, 从而实现不同的硬件组织及功能. 本文针对无线传感器网络节点的硬件自修复, 提出一种基于重构器件 FPAA 的无线传感器网络节点仿生自修复方法, 并以应变无线传感器网络节点为对象, 研制了仿生自修复无线传感器应变节点, 可在节点部分硬件电路失效的情况下, 实现节点对自身故障的自诊断及对故障电路的自修复, 实验结果表明所研制的节点成功实现了 2 种硬件故障的自修复.

1 自修复无线传感器节点构架

典型的应变无线传感器网络节点的结构如图 1 所示. 主要包括 3 个部分^[11]: 传感模块、信号处理模块和无线收发模块. 传感模块包含应变桥路、放大器和滤波器, 由电源模块为其提供高精度的桥压. 传感模块将应变桥路输出信号进行放大、滤波处理后信号输出至信号处理模块. 信号处理模块包含一个 A/D 转换器, 一个微处理器及其外围电路, 这一部分执行数据采集、信号处理、数据通信等任务. 无线收发模块向基站或网络中的其他节点发送或接收应变数据.

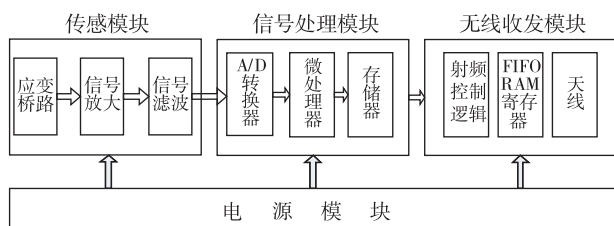


图 1 应变无线传感网络节点基本结构

Fig. 1 A typical WSN strain sensor node structure

在生物界中, 动植物可对自身故障进行检测并实现自修复. 参照此机理, 本文针对应变节点传感模块的应变桥路—信号放大—信号滤波这条传感信号链路, 设计由 FPAA 构成的传感模块, 并设计其自诊断和自修复功能. 在该模块中, 采用 FPAA 内部

模块实现节点的上述传感信号链路, 在节点的信号处理模块中设计传感链路的故障诊断功能及自修复控制功能. 基于上述思想设计的具有自修复功能的无线应变传感节点的架构如图 2 所示.

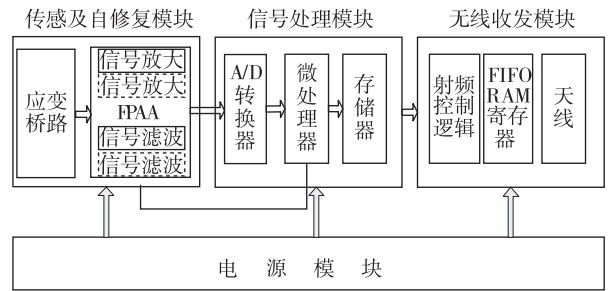


图 2 自修复节点设计构架

Fig. 2 The FPAA-based self-repairing node structure

2 自修复无线传感器节点的设计与实现

2.1 硬件设计

基于对功耗、I/O 引脚数目、重构速度、芯片体积等考虑, 本设计采用 Anadigm 公司的 AN231E04 FPAA 芯片, 其体积小、功耗低并且具有足够的 I/O 管脚. 该芯片采用 3.3 V 供电, 功耗仅为 125 mW, 尺寸仅为 7 mm × 7 mm × 0.85 mm. 该芯片的一个主要特征是当其以动态模式运行时, 单片机能够对其进行实时配置. AN231E04 包含 4 个可配置模拟块 (CAB), 7 个 I/O 单元. 配置信息储存在片上的 SRAM 配置内存中, 拥有一个 SPI 串口, 可以接收来自微处理的配置数据, 图 3 给出了 AN231E04 的内部结构. 本设计采用易操作的图形化软件 Anadigm-Designer2 software 对 FPAA 进行实时配置, 能够迅速地构建复杂的模拟电路并下载到 FPAA 中.

信号处理模块的设计中, 参照项目组前期研发的 Cute007 节点使用的 MSP430 系列单片机 (<http://www.anadigm.com>). 在此基础上, 扩展其与 FPAA 层的连接. 无线收发模块直接使用 CuteNew 节点以 CC2420 为核心的无线收发模块, CC2420 是 Chipcon 公司在 2003 年底推出的一款符合 2.4 GHz ZigBee 协议标准的无线收发芯片, 具有很高的集成度, 该芯片体积小、功耗低, 非常符合无线传感网络的要求. 根据自修复节点的设计构架, 将节点硬件分 2 层, 如图 4 所示, 上层是无线收发层, 下层包含传感模块、自修复模块和故障诊断模块. 本文主要考虑自修复功能的实现与验证, 所以针对节点的电源情况, 采用外部提供 3.3 V 的方式进行供电. 外部电源从传感

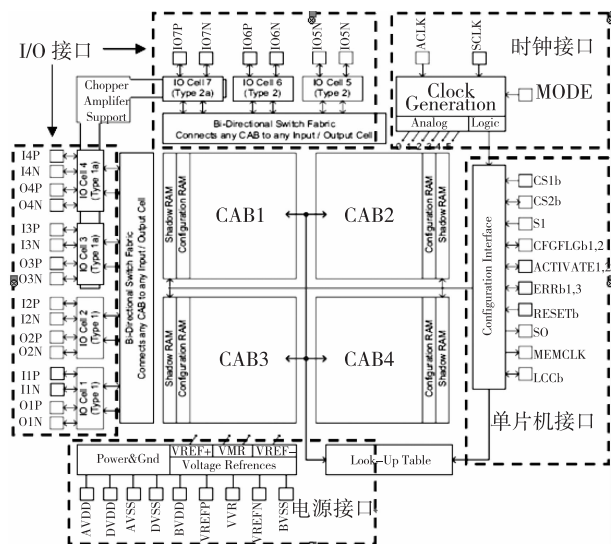


图3 AN231E04 内部结构

Fig.3 Internal structure of AN231E04

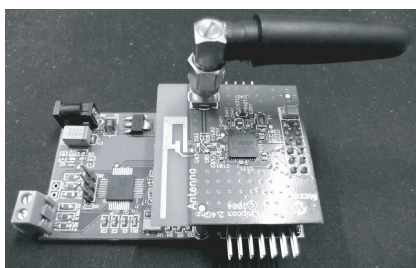


图4 自修复节点硬件层次及研制的实物照片

Fig.4 The FPAAs-based self-repairing WSN strain node

及其冗余层电源接口给入,并由此处向其他层次供电。

自修复节点主要的电路连接关系如图5所示。其中,应变片桥路的输出与FPAAs的模拟通路连接。应变信号经由桥路以差分输入的方式输入FPAAs,由FPAAs内部虚拟导线连至放大器,其放大倍数为180倍,信号输入FPAAs,再由虚拟导线连至放大器构成的二阶低通滤波器,滤除50 Hz以上高阶噪声后,由微处理器MSP430控制其内部A/D进行数据的采集,数据传送给无线收发模块CC2420后可进行无线收发。当MSP430检测到硬件电路故障时,可在线修改FPAAs配置,使其构造出新的硬件电路来取代故障器件,实现自修复的目的。

本文中,选用2种硬件电路故障及其修复来说明节点自修复原理,分别是故障1:传感模块中放大器饱和故障;故障2:滤波器断路故障。

在节点设计中,设置了2个模拟开关来制造故

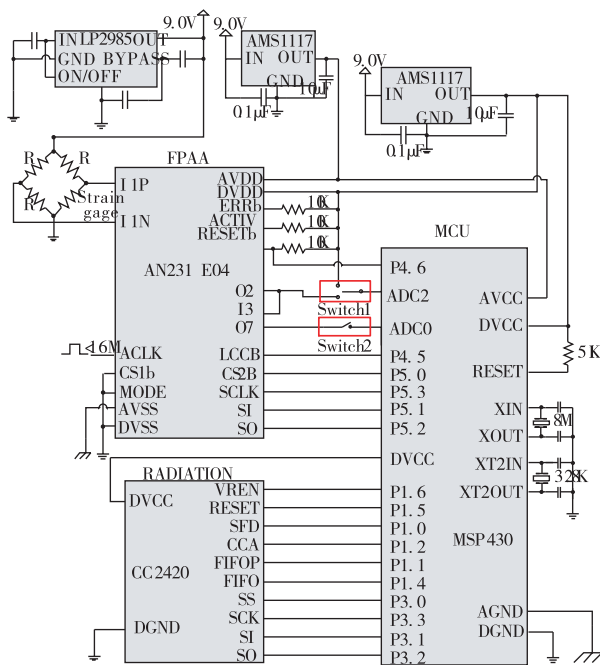


图5 自修复节点电路原理

Fig.5 Circuit design of the FPAAs-based self-repairing node

障。其中开关1用于切断AMP_1 (FPAAs中虚拟放大器)和单片机的连接,并将3.3 V电源电压连至ADC2来模拟放大器饱和故障;开关2用于切断Filter_1 (FPAAs中虚拟滤波器)和ADC0的连接来制造滤波器断路故障。放大器饱和故障时,ADC2将输入3.3 V电压,滤波器断路故障时,ADC2将输入0 V电压,这2类电压都不在应变正常测试电压范围内,因此如果微处理器监测到传感模块输出超过2.5 V或者低于0.5 V,说明结构发生过载或者FPAAs内虚拟器件损坏,此时由微处理器控制FPAAs完成自修复。

2.2 软件设计及故障诊断与自修复流程

自修复节点软件的故障诊断和自修复流程如图6所示。

图6中的各电路对应的FPAAs内部配置情况如图7所示。节点初始采用正常FPAAs配置,放大器由FPAAs内部模块CAB1中的电路实现,滤波器由FPAAs内部模块CAB2中的电路实现(图7a),此时节点程序在正常进行应变数据采集过程后,还将进行一个故障检测过程。在本文中,节点将检查由ADC2输入的测试数据,如果数据正常,节点将返回原来工作流程,继续正常测试应变;如果节点发现数据过大,超过正常的最大2.5 V范围,根据故障特征,应发生放大器饱和故障,节点会调用配置程序配

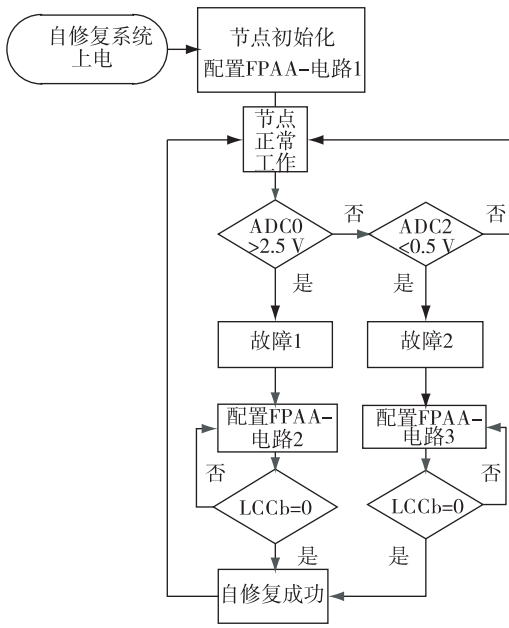


图 6 节点自修复流程

Fig. 6 Failure diagnosis and self-repairing process

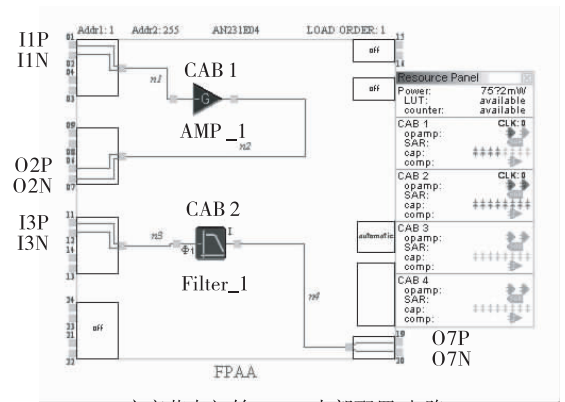
置 FPAAs 内部电路成电路 2,如图 7b 所示. 此时,采用 FPAAs 内部 CAB3 模块内部的电路重新配置新的放大器取代原放大器实现故障的修复. 同理,当滤波器电路发生故障时,节点将检测到所采集的数据小于正常测试数据的下限,微处理器将动态配置 FPAAs,形成电路 3,如图 7c 所示. 采用 FPAAs 内部 CAB4 模块的电路重新实现一个新的滤波器,取代原滤波器. 图 6 中 LCCb 为 FPAAs 自修复完成情况标志位,其值为 0 时,表示自修复已成功完成.

AN231E04 采用的软件为 AnadigmDesigner2,这是一种图形化处理软件. 片内 I/O 单元对应显示界面上的 I/O 单元模拟接口.

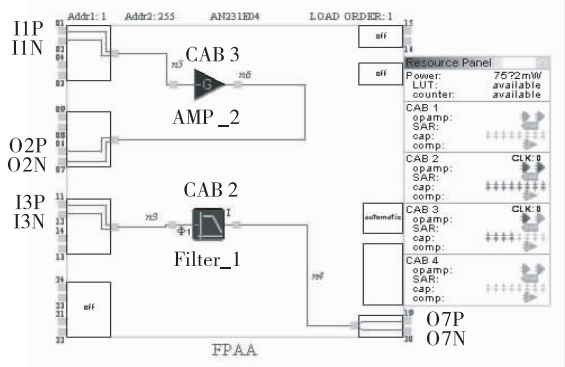
2.3 演示系统设计

自修复应变节点采集到的数据以无线通讯的方式发送到基站,再通过上位机软件进行显示. 基站节点采用基于 MPS430 和 CC2420 的无线收发节点,如图 8 所示. 节点上表面是一个 USB 转串口的桥接模块和 CC2420 无线收发模块以及板载天线,节点下表面是 MPS430 单片机. MPS430 通过其 SPI 接口与 CC2420 通讯,完成无线收发功能,通过 USB 转串口桥接模块完成向上位机发送通过无线接收到的数据功能,基站节点与上位机连接通讯,完成应变数据的接收和自修复状态监控等功能演示.

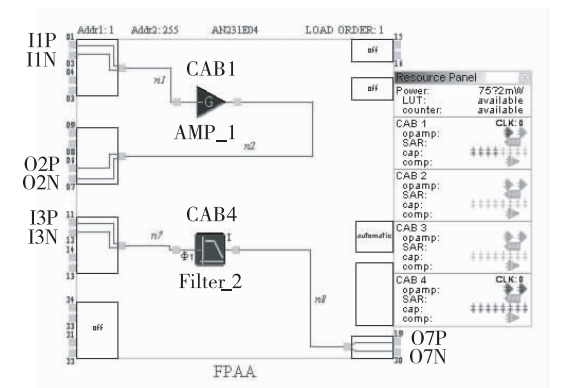
上位机软件是基于 LabVIEW 编写的,包含了串口通讯、数据接收、数据显示、状态显示、数据标定等



a. 应变节点初始FPAAs内部配置(电路1)



b. 放大器饱和故障后的FPAAs的内部修复配置(电路2)



c. 滤波器故障后的FPAAs的内部修复配置(电路3)

图 7 自修复节点的不同电路配置

Fig. 7 Different circuit configurations of the self-repairing node

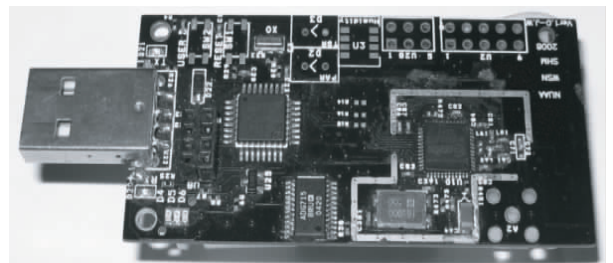


图 8 基站节点

Fig. 8 Base station node

主要功能. 在软件中设置调零功能, 通过初始调零, 测量到的应变会更加精确. 上位机软件界面如图 9 自修复演示系统所示.

3 实验验证

为考察节点自修复功能, 本文搭建了一个悬臂梁应变实验系统. 悬臂梁一端固支, 另一端通过施加重量改变梁上的应变大小, 梁的根部贴有应变片, 与自修复无线传感网络节点连接, 自修复节点将监测数据通过无线方式传至基站节点, 测试数据保存在计算机中并实时显示在软件界面上. 基站的数据接收频率为 1 Hz. 实验系统如图 9 所示.

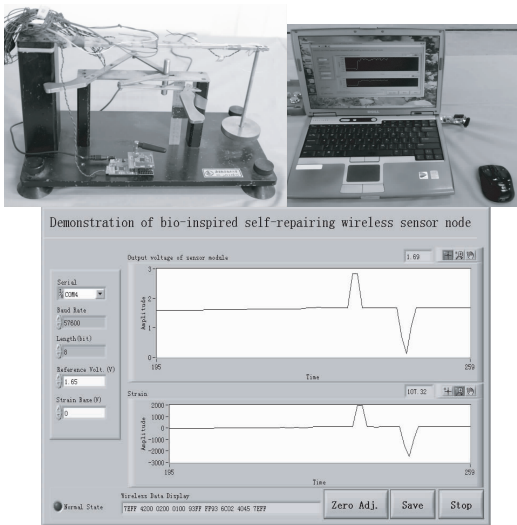


图 9 自修复演示系统

Fig. 9 Self-repairing demonstration system

为了验证自修复无线传感器节点的整个工作过程——包括正常工作状态和自修复状态, 在本文中设计了如下实验流程: 1) 正常工作状态; 2) 放大器饱和及自修复过程; 3) 滤波器断路及自修复过程. 数据通过节点发送至基站, 监测这些数据即可获得节点的工作状态. 图 10 显示了整个流程中基站收到的数据情况. 在第 1 个阶段, 节点正常工作, 随着加载重量的增加 (0, 1 kg, 2.5 kg), 节点的输出也正常增加 (0, 342 $\mu\epsilon$, 855 $\mu\epsilon$), 并且对应相应的电压输出 (1.65 V, 1.75 V, 1.89 V); 在第 2 阶段, 出现放大器饱和故障, 节点输出电压急剧上升, 直至 3.3 V, 软件诊断出该故障并且启动自修复过程, 这一过程完成后, 节点的输出很快降低到了正常值; 在第 3 阶段, 滤波器断路故障出现, 在这种情况下节点的输出降到了 0 V. 节点诊断并修复该故障后, 节点的输出上

升到了正常值. 以后节点继续正常工作.

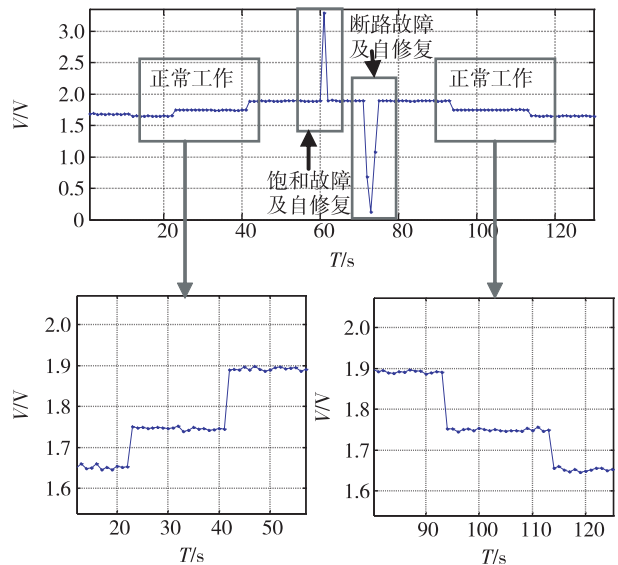


图 10 实验中自修复节点输出

Fig. 10 Output of the self-repairing node during experiments

上述实验表明, 节点在 2 种硬件故障的情况下, 有效检测到了故障, 并成功实现了自修复.

4 总结

本文设计了一种基于仿生硬件的具有自修复功能的应变无线传感网络节点, 并通过实验验证了能够进行快速的自修复. 实验结果表明: 该方案能够使节点对自身部分硬件电路的失效进行自检及自修复.

在下一步工作中, 将针对以下几点进行深入研究: 1) 可以针对无线传感器节点的硬件, 研究更为复杂的模块失效情况; 2) 本文的自修复无线传感器节点故障诊断方法比较简单, 有待进一步加深.

参考文献

References

- [1] 孙利民, 李建中, 陈渝. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005
SUN Limin, LI Jianzhong, CHEN Yu. Wireless sensor networks[M]. Beijing: Tsinghua University, 2005
- [2] Polastre J R. Design and implementation of wireless sensor networks for habitat monitoring[D]. The Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California at Berkeley, 2003
- [3] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey [J]. Computer Networks, 2008, 52 (12): 2292-2330
- [4] Wu J, Yuan S F, Ji S, et al. 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
- [5] Ko J, Gao T, Rothman R, et al. Wireless sensing systems in clinical environments improving the efficiency of the patient monitoring process [J]. *Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 2010, 29(2): 103-109
- [6] Yu M, Mokhtar H, Merabti M. A survey on fault management in wireless sensor network [C] // *The 8th Annual Post Graduate Symposium*, UK, 2007
- [7] Yang E, Erdogan A T, Arslan T, et al. Multi-objective evolutionary optimizations of a space-based reconfigurable sensor network under hard constraints [C] // *ECSIS Symposium on Bio-inspired, Learning, and Intelligent Systems for Security*, 2007: 72-75
- [8] Dressler F. Benefits of bio-inspired technologies for networked embedded systems: An overview [C] // *Dagstuhl Seminar 06031 on Organic Computing-Controlled Emergence*, Schloss Dagstuhl, Wadern, Germany, 2006
- [9] 杨伟伟. 基于可编程阵列的仿生自修复无线传感网络节点研制 [D]. 南京: 南京航空航天大学航空宇航学院, 2009
YANG Weiwei. The development of bio-inspired self-healing wireless sensor network and node based on programmable array [D]. Nanjing: College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009
- [10] Dressler F, Akan O B. Bio-inspired networking: from theory to practice [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2010, 48(11): 176-183
- [11] 吴键, 袁慎芳, 殷悦, 等. 基于 ZigBee 技术的无线传感器网络及其应用研究 [J]. *测控技术*, 2008, 27(1): 13-16
WU Jian, YUAN Shenfang, YIN Yue, et al. Wireless sensor networks and application research based on ZigBee technology [J]. *Measurement & Control Technology*, 2008, 27(1): 13-16
- [12] 董晨华. 用于结构监测的智能无线传感器网络的设计 [D]. 南京: 南京航空航天大学航空宇航学院, 2010
DONG Chenhua. Design of smart wireless sensor networks for structural monitoring [D]. Nanjing: College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010
- [13] 殷悦, 袁慎芳, 吴键, 等. 基于无线传感器网络的远距离结构健康监测 [J]. *传感器与微系统*, 2007, 26(6): 33-38
YIN Yue, YUAN Shenfang, WU Jian, et al. Long-distance structural health monitoring based on wireless sensor networks [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2007, 26(6): 33-38

Wireless sensor network node self-repairing method based on bio-inspired hardware

TONG Yao^{1,2} YUAN Shenfang^{1,2} QIU Lei^{1,2} ZHANG Bingliang^{1,2}

1 College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016

2 The Aeronautic Key Laboratory of Smart Material and Structure,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016

Abstract Ordinary wireless sensor network nodes are hardware fixed and unable to change their node configuration during service. This paper proposes a new self-repairing method based on bio-inspired evolvable hardware for wireless sensor network node. By using bio-inspired evolvable hardware, the nodes can be implemented with self-repairing ability which can dynamically change the node's hardware structure and behavior to repair themselves in case of component hardware failures. This paper proposes a bio-inspired self-repairing method for wireless sensor network nodes. A FPAAs-based self-repairing node is developed and its self-repairing function is evaluated. Experiments show that the node can diagnose the failures and recover to normal working state automatically. The research presented can improve the safety and robustness of the wireless sensor network.

Key words wireless sensor network; bio-inspired hardware; Field Programmable Analog Array (FPAAs); self-repairing node; dynamical reconfiguration