

一种面向航空结构的具有穿透能力的无线节点^{*}

袁慎芳, 凌必赞, 任元强, 高尚

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

摘要 针对结构健康监测中应用的无线节点结构穿透能力差的问题,提出了一种面向航空结构的具有穿透能力的 433 MHz 无线节点的设计方法。给出了节点的详细硬件设计及通讯协议设计方法,实验对比了所设计节点和常规应变测试系统的应变测试结果,验证了节点设计方法的正确性。在封闭飞机机翼盒段内部布置节点,实验对比了所设计节点和基于 2.4 GHz 的 Telosb 节点的通信丢包率。结果表明,所设计节点的结构穿透能力强于 Telosb 节点。功耗测试结果也表明,所设计节点的功耗小于 Telosb 节点。

关键词 无线应变节点; 结构穿透能力; 结构健康监测; 碳纤维复合材料机翼盒段

中图分类号 TP393; TH89

引言

近年来,无线传感器网络(wireless sensor networks,简称 WSNs)在结构健康监测领域得到了快速发展和广泛应用。相对于有线信号传输,无线传感器网络具有轻质、经济和易维护等优点^[1-2],并且能够在不破坏结构的情况下实现信号的传输。以飞机和船舶结构为例,其内部结构多为封闭或半封闭,且对结构的气密性和水密性有较高的要求,无线传感器能够保证在结构完整性的前提下实现监测功能。目前,无线传感器越来越多地应用于封闭或半封闭结构的健康监测。Knight^[3]指出对飞机密闭结构的载荷监测不能采用有线信号传输的方式。Microstrain 公司将无线应变节点放置在 F-22 的机翼盒段内进行应变监测测试^[4]。文献^[5]将无线传感器布置在飞机的机翼结构和船舶船尾的密闭推进装置内,分别用于对机翼紊流的监测和对船舶推进装置水下工作环境的监测。但是,无线信号的传播伴随着能量的衰减,包括路径损耗和穿透损耗。特别当无线传感器处于封闭或半封闭的金属结构时,该结构可以近似成一个法拉第笼^[5-6],巨大的穿透损耗可能导致无线信号无法穿透结构。即使最终穿透了结构,也会由于信号强度的剧减,导致丢包率的增加

和穿透结构之后传输距离的缩短。数据重传机制和中转节点能够在一定程度上缓解无线通讯质量下降的问题,但也相应地增加了网络的功耗,占用了信道,降低了网络的执行效率^[7]。所以,研究并提高无线信号的结构穿透能力具有实际意义。

目前,用于结构健康监测的无线节点的工作频段主要为 IEEE802.15.4 协议的 2.4GHz。属于工业科学医学(industrial scientific medical,简称 ISM)频段的 2.4 GHz 在全世界范围无需许可证,在工业中得到广泛应用,但是 2.4 GHz 频段在墙壁和金属上的传播会有很大的衰减。相对于 2.4 GHz,433 MHz 也属于 ISM 频段,由于频率更低,所以 433 MHz 的结构穿透能力更强。另外,该频段在各种系统中应用比较少,具有较好的传输特性^[8]。

笔者针对无线信号结构穿透能力的问题,设计了一种具有结构穿透能力的无线应变节点。该节点采用信号穿透能力强的 433 MHz 频段,发射功率为 -1~20 dBm。介绍了节点的软硬件研发和节点通讯协议的设计。实验验证了该无线应变监测节点的功能,比较了在碳纤维复合材料机翼盒段中该节点与 Telosb 节点的结构穿透能力,证明了该节点的结构穿透能力强于基于 2.4 GHz 的 Telosb 节点,其无线节点部分的功耗小于 Telosb 节点。

^{*} 国家杰出青年基金资助项目(51225502);江苏省优势学科创新平台资助项目;南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金资助项目(kfj130102);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(NN2012051)

收稿日期:2014-06-01;修回日期:2014-08-09

1 无线信号结构穿透能力

根据平面电磁场理论,无界均匀有耗介质内电磁波的电场表达式为

$$E(r) = E_0 e^{-(\alpha + j\beta)r} \quad (1)$$

$$\alpha = \omega \sqrt{\mu\omega/2[\sqrt{1 + (\sigma/\omega\epsilon)^2} - 1]} \quad (2)$$

其中: E_0 为常矢量,代表电场矢量的起始振幅与极化方向; r 为传播方向的矢径; α 为幅值衰减系数; β 为相位衰减系数; ω 为无线信号工作频率对应的角频率; ϵ 为介电常数; μ 为磁导率。

由式(1)可知,电磁波的振幅随着 $e^{-\alpha r}$ 指数规律衰减。由式(2)可知,当介电常数和磁导率为确定值时,随着无线信号工作频率增加,幅值衰减系数也相应增加。所以,无线信号工作频率越高,其在介质内的传播损耗越大。郭山红等^[8]基于墙体穿透对电磁波的穿透能力进行了研究。除了电磁波在墙壁介质内传输外,还基于菲涅尔公式考虑了电磁波入射墙体和出射墙体的损耗。仿真结果表明,随着无线信号工作频率的升高,其穿透损耗也在升高。

除了仿真,实验研究也证明了低频无线信号的结构穿透能力更强、通讯质量更好。文献[9]基于机器对机器(machine to machine,简称M2M)通信对433 MHz和2.4 GHz频段上的穿透能力进行了比较,实验证明了433 MHz传输距离更远。Tanghe等^[10]采用MoCo节点,基于集装箱无线节点的工作环境,建立了路径损耗模型,证明了433 MHz频段上的穿透损耗低于2.4 GHz频段。Isnin^[11]比较了433,868和1 249 MHz 3个频段在楼宇通信中的传播性能,实验证明433 MHz有更好的穿透性能。

根据理论和实验分析可得,对于同为ISM频段的433 MHz和2.4 GHz来说,433 MHz的结构穿透能力要强于2.4 GHz,所以笔者选用433 MHz作为传输频段。

2 无线应变节点硬件设计与实现

具有结构穿透能力的无线应变节点的设计必须满足应变监测信号采集转换和无线信号穿透结构的要求。同时,也要实现节点的小型化、高速、低功耗和稳定性。其架构图如图1所示。

节点的硬件分成3个模块:应变传感模块、主控模块和无线通信模块。应变传感模块输出并调理应变监测信号。主控模块承担对应变监测数据的读取、A/D转换和对射频模块的操作任务。无线通信

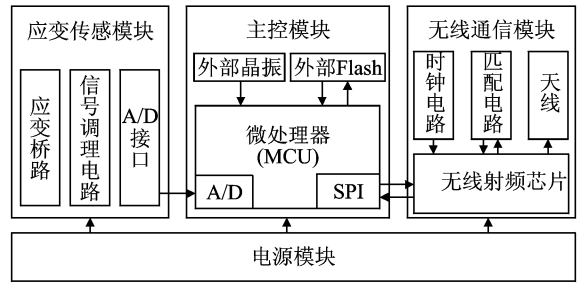


图1 无线应变节点基本架构

Fig. 1 Hardware structure of wireless strain node

模块负责无线信号的收发。

为了增强节点的无线信号穿透能力,无线通信模块采用Silicon Labs公司的SI4432为核心的无线通信模块。SI4432是一款高度集成的无线ISM频段收发芯片,其工作频段范围为240~930 MHz,具有极高的接收灵敏度(-121 dBm),发射功率最高可达20 dBm。相对于目前常用的射频芯片,其工作频段包含无线信号结构穿透能力较强的433 MHz,具有更大的发射功率可调范围。SI4432的TX引脚为射频信号发送端,RXp和RXn引脚为差分信号接收端。MSP430F1611通过串行外设接口(serial peripheral interface,简称SPI)对SI4432进行寄存器的配置。SI4432通过nIRQ引脚将相应的中断发送到主控模块。该节点采用单天线进行数据的收发,用单刀双掷芯片不断切换节点的收发状态。

应变传感模块共有4个应变传感和信号调理通道。应变传感模块中,应变桥路的工作方式为单臂电桥,电阻的阻值为120Ω。电桥输出的应变监测信号经过程控放大芯片的信号放大和滤波电路的低通滤波,传输到主控模块。主控模块以MSP430F1611微处理器为核心。MSP430系列微控制器是美国TI公司推出的超低功耗、高性能的16位混合信号处理器,内置有12位高精度A/D,并且A/D转换速度超过200 ks/s。

节点的硬件实物如图2所示。节点分为上下两层,应变传感模块以应变监测电路板的形式位于下层;主控模块和无线通信模块以433 MHz无线节点的形式位于上层,并且设计有USB接口和串口转USB芯片,使得节点在只有主控模块和无线通信模块时能够用作接收节点。

3 无线应变节点软件设计与实现

在应变数据无线传输过程中,发送和接收节点的工作遵循一定的协议流程。协议流程分3部分,

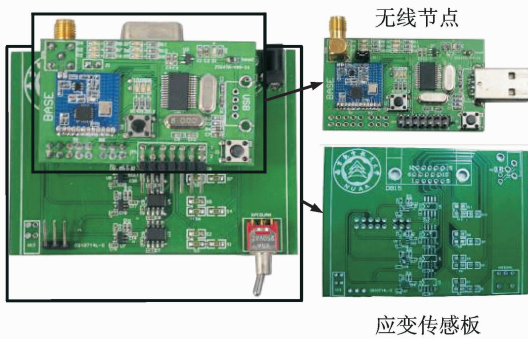


图2 无线应变节点实物

Fig. 2 Wireless strain node developed

分别为初始化部分、采集发送部分和接收上传部分。

采集发送节点和接收节点初始化主要分成 MCU 初始化和 SI4432 初始化。MCU 初始化设置包括设置 MCU 的时钟系统、引脚、SPI 接口和中断系统等。接收节点额外需要设置接收节点 MCU 的串口和串口中断向量。对 SI4432 的配置,主要配置调制解调方式、载波频率、数据包格式、接收校验、数据发送速率、接收滤波带宽和发射功率等。无线通信参数的设置将决定节点的无线通信质量。关闭 MCU 和 SI4432 的部分时钟系统降低节点的功耗,开启接收节点的 MCU 串口中断和采集发送节点的管脚下降沿触发中断,节点设置为低功耗模式等待触发。

采集发送流程图如图 3(a)所示。采集发送节点收到控制命令后,初始化并开启 MCU 的 A/D 和定时器,不断触发定时器中断程序。定时器中断触发程序包括 A/D 采样转换、清空 FIFO、关闭 SI4432 除发送中断以外的所有中断、将有效数据填入 FIFO 及使能发送功能等步骤。当数据包发送完成时,中断信号引脚 nIRQ 会被拉低并告知 MCU。MCU 读取中断标志寄存器,该操作会自动拉高 nIRQ,否则继续等待。一次数据发送成功后关闭发送使能,进入下一次采集发送,循环往复。

接收上传的流程图如图 3(b)所示。接收节点在接收数据前先清空 SI4432 的 FIFO,然后关闭 SI4432 除接收中断外所有中断,最后使用节点的接收功能,节点进入等待接收状态。当节点接收完数据后,数据存储在 SI4432 的 FIFO 中,引脚 nIRQ 变为低电平并触发 MCU 的中断触发程序。在中断触发程序中,MCU 分别读取中断标志寄存器,自动拉高了引脚 nIRQ,关闭节点接收功能。从 FIFO 中读取接收数据且通过串口向上位机上传数据,然后进入下一次数据接收流程,循环往复。

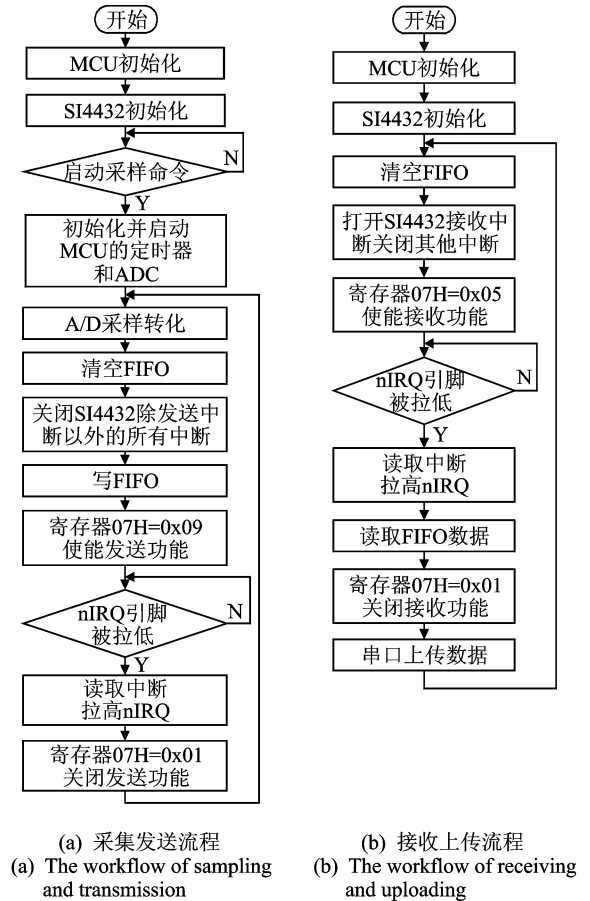


图3 节点工作流程

Fig. 3 The workflow of node

4 实验验证

4.1 应变监测功能测试

实验对象为碳纤维复合材料机翼盒段。在机翼盒段的背部铝板上并排粘贴两个电阻应变片,将其中一个电阻应变片连接到无线应变节点的输入端口。节点将监测到的数据通过无线方式传输到基站节点,测试的数据实时显示在上位机界面上。为了验证节点测得的应变数据,将另一个电阻应变片与动态应变仪连接,实验比较节点测得的应变数据与应变仪测得的应变数据。机翼盒段背部铝板所载荷由丝杠提供,通过旋转丝杠调节载荷大小。电阻应变片与加载位置的距离不宜过小,过小会导致不同位置的应变剧烈变化,此处两者相距 30 cm。实验系统如图 4 所示。

分析节点协议执行时间、采集时间和无线发送时间等得出该应变节点的最大采样率为 410 Hz。将节点的采样率设置成 410 Hz。实验时首先旋转丝杠两圈作为预应力,然后不断旋转丝杠,每次旋转

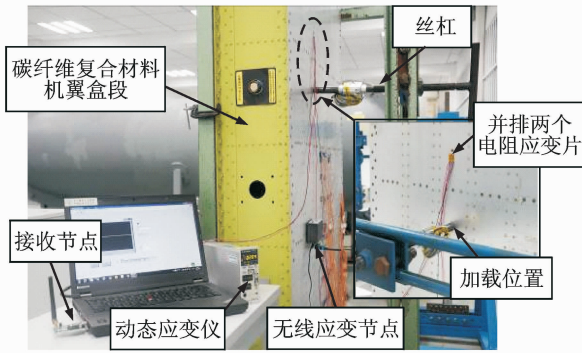


图 4 应变监测功能验证实验系统

Fig. 4 Experiment setup with wireless strain node and dynamic strain meter for strain monitoring

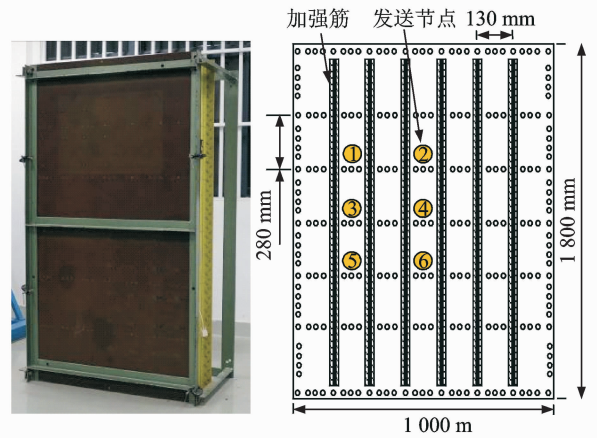


图 5 碳纤维复合材料机翼盒段

Fig. 5 Positions for transmitting node in wing box

一圈。当数值稳定后采 5 s 应变数据做平均。前后共完成 3 次静强度循环。表 1 为三轮静力循环实验的应变平均值和应变仪测量值。

表 1 无线应变节点与应变仪的应变值对比

Tab. 1 Measured strain for each load					
载荷(旋进丝杠圈数)	1	2	3	4	5
应变节点	11	24	33	46	59
应变仪	11	24	33	46	59
载荷(旋进丝杠圈数)	6	7	8	9	10
应变节点	73	84	102	117	128
应变仪	73	84	103	119	129

表 1 可知,无线应变节点测得应变数据与应变仪最大绝对偏差为 $2 \mu\epsilon$,最大相对偏差为 1.7%,所以该无线应变节点能用于对结构的应变测量。

4.2 结构穿透能力测试

实验对象为碳纤维复合材料机翼盒段。考虑到机翼盒段开口的大小,将无线应变节点的上层板即 433 MHz 无线节点置于机翼盒段内部进行数据采集和发送。碳纤维复合材料机翼盒段如图 5 所示。分别将发送节点放置在图 5 所示的位置 1~6,测试在机翼盒段中的不同位置无线信号穿透机翼盒段的能力。

实验比较 433 MHz 无线节点和 Telosb 节点的无线信号穿透机翼盒段的能力。Telosb 节点是 CrossBow 公司研制的一款基于 Zigbee 协议的无线传感平台,主控芯片也是 MSP430 系列,射频芯片为 CC2420,工作频段为 2.4 GHz,发射功率为 $-25 \sim 0$ dBm。Telosb 节点作为无线传感平台已应用于无线应变监测节点。另外,CC2420 应用于 Tmote-Sky 和 MICAZ 等,为目前熟知的应变监测的无线传感平台。因此在结构穿透能力测试中,

Telosb 节点具有代表性。

实验系统如图 6 所示。接收节点置于一个支架,并且与计算机连接。发送节点置于机翼盒段中。发送节点与机翼盒段的最大距离为 15 m。用铝块封住机翼盒段的所有开口,形成一个密闭空间。433 MHz 无线节点与 Telosb 节点发射功率均设为 -1 dBm,均采用与其频段相对应的天线,天线的增益均为 3 dB。以丢包率(packet loss rate,简称 PLR)衡量通讯质量,每次无线信号的收发时间为 15 min。测试机翼盒段和接收节点在不同距离下的丢包率。实验结果如图 7 所示。

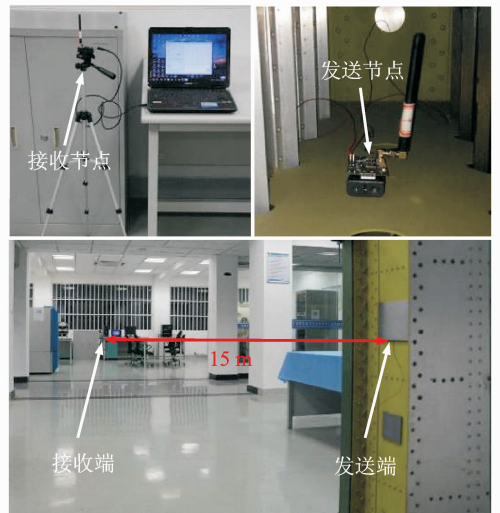


图 6 结构穿透能力实验系统

Fig. 6 Experiment setup for structure-penetrating test

由图 7 可知,当发送节点与接收节点的距离在 0~10 m 时,433 MHz 无线节点和 Telosb 节点的丢包率都为 0 左右。当发送节点与接收节点的距离增

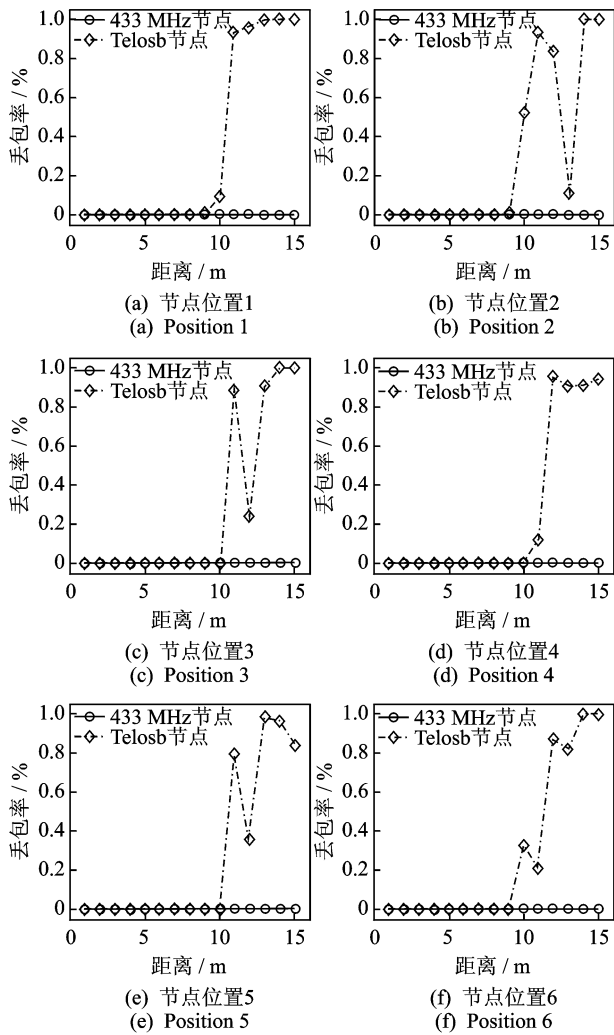


图7 433 MHz无线节点和 Telosb 节点丢包率

Fig. 7 PLR for different positions

加到 10 m 以上时, Telosb 节点的丢包率陡然上升, 最后会维持在 90%~100%。此时 433 MHz 无线节点的丢包率依然维持在 0 左右, 可以证明 433 MHz 无线节点接收到的信号强度要高于 Telosb 节点, 433 MHz 频段无线信号的结构穿透能力要强于 2.4 GHz 频段。考虑到 433 MHz 无线节点的最大发射功率为 20 dBm, 远大于 Telosb 节点的最大发射功率 0 dBm, 所以 433 MHz 无线节点的结构穿透能力将远大于 Telosb 节点。

4.3 无线节点功耗测试

射频芯片 SI4432 的发射功率有 -1, 2, 5, 8, 11, 14, 17 和 20 dBm 共 8 个档位。分别测量了当采样率为 32 Hz 时 433 MHz 无线节点在各个发射功率下的功耗。功耗测试流程如图 8 所示。

首先, 实时测量节点输入电流的波形; 然后, 对一个采集发送周期的电流波形进行积分; 最后, 乘以

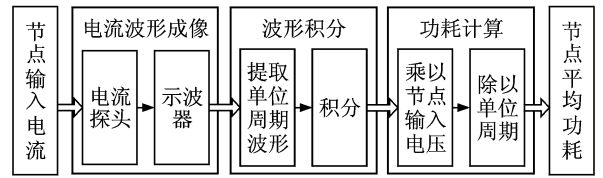


图8 功耗测试流程图

Fig. 8 The flow of energy consumption measurement

节点输入电压并除以采集发送周期的时间, 得到节点的平均功耗。

$$P = U/T \int_{\tau} i dt \quad (3)$$

其中: P 为节点的平均功耗; T 为一个采集发送周期; U 为节点的输入电压; i 为在一个采集发送周期内的节点输入电流。

节点功耗测试结果如表 2 所示。

表 2 433 MHz 无线节点功耗

Tab. 2 Measured energy consumption

发射功率/dBm	功能功耗/mW
-1	38.7
2	39.2
5	39.5
8	40.2
11	41.3
14	43.3
17	45.9
20	54.8

以同样的方法测量 Telosb 节点的功耗。当发送功率为 -1 dBm、采样率为 32 Hz 时, Telosb 节点的功耗为 68.1 mW, 大于 433 MHz 无线节点在所有发射功率下的功耗。这是因为相对 CC2420 射频芯片, SI4432 射频芯片具有低功耗的工作模式。当节点不处于发送状态时, SI4432 能被设置为低功耗状态而非接收状态, 这大大减小了节点的输入电流, 减小了节点的功耗。通过理论和实验分析可以证明, 433 MHz 无线节点的功耗小于 Telosb 节点。

5 结束语

针对飞机结构应变监测的需求, 研制出了一种具有结构穿透能力的无线应变节点。该节点采用 433 MHz 频段传输数据, 实验证明该节点能够应用于应变监测; 在相同发射功率下该节点比基于 2.4 GHz 的 Telosb 节点具有更强的结构穿透能力; 无线部分的功耗小于 Telosb 节点。该无线应变节点能够推进无线传感网络技术在飞机结构健康监测中

的实际应用,对提高飞机结构安全、降低飞机维护成本具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Bocca M, Eriksson L M, Mahmood A, et al. A synchronized wireless sensor network for experimental modal analysis in structural health monitoring [J]. *Computer - Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2011, 26(7): 483-499.
- [2] 袁慎芳, 邱雷, 童瑶, 等. 基于 FPAA 的自修复智能无线传感器节点 [J]. *振动、测试与诊断*, 2012, 32(5): 1588-1593.
Yuan Shenfang, Qiu Lei, Tong Yao, et al. FPAA based self-repairing wireless sensor network node [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2012, 32(5): 1588-1593. (in Chinese)
- [3] Knight C G. *Wireless networks: implications for aircraft loads monitoring*, No. DSTO-TN-0759 [R]. Australia: Defense Science and Technology Organization, 2007.
- [4] Arms S W, Wood M, Swift S. *Wireless strain measurement systems for aircraft test* [J]. *Aerospace Testing Expo*, 2006, 16(5): 125-136.
- [5] Ong M, Thompson H A. Challenges for wireless sensing in complex engineering applications [C] // IEC-ON 2011-37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Melbourne, Australia: [s. n.], 2011: 2016-2111.
- [6] Zhou Yiqing, Pan Zhengang, Hu Jinglong, et al. *Broadband wireless communications on high speed trains* [C] // 20th Annual Wireless and Optical Communications Conference. Newark: [s. n.], 2011: 1-6.
- [7] Li G Y, Xu Zhikun, Xiong Cong, et al. Energy-efficient wireless communications: tutorial, survey, and open issues [J]. *Wireless Communications, IEEE*, 2011, 18(6): 28-35.
- [8] 郭山红, 孙锦涛, 谢仁宏, 等. 电磁波穿透墙体的衰减特性 [J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(1): 113-117.
Guo Shanrong, Sun Jintao, Xie Renhong, et al. Attenuation characteristics of electromagnetic wave penetrating [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(1): 113-117. (in Chinese)
- [9] Tuset-Peiró P, Anglès-Vazquez A, López-Vicario J, et al. On the suitability of the 433 MHz band for M2M low-power wireless communications: propagation aspects [J]. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2014, 25(12): 1154-1168.
- [10] Tanghe E, Joseph W, Ruckebusch P, et al. Intra-, inter-, and extra-container path loss for shipping container monitoring systems [J]. *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, 2012, 11: 889-892.
- [11] Isnin I. *A study on wireless communication error performance and path loss prediction* [D]. Plymouth: University of Plymouth, 2011.



第一作者简介:袁慎芳,女,1968年4月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为结构健康监测、先进智能传感技术、无线传感器网络和信号信息处理技术。曾发表《A miniaturized composite impact monitor and its evaluation research》(《Sensors and Actuators Physical》2012, No. 184)等论文。
E-mail: ysf@nuaa.edu.cn