

32 位高性能传感器网络硬件平台的设计与开发^{*}

侍智融 蒋磊 张伟 朱劲 邱旻骏

(同济大学电子与信息工程学院控制科学与工程系 上海 201804)

摘要：灵活可扩展的高性能无线传感器网络硬件是支撑科学研究与工程实践必不可少的基础平台。以高性能低功耗的 STM32 微控制器和高灵敏度 CC2520 无线收发器为核心芯片，设计开发了基于 Cortex 内核的新一代 32 位传感器网络开源硬件平台 OpenWSN 节点，并提供了符合通用模块互联总线规范的外扩接口，以方便与各种传感器和外扩功能板连接。在开源 OpenWSN 软件的支持下可快速构建传感网研究与应用平台。该设计遵循低功耗、高扩展、高可靠、低成本和微型化原则，实测表明具有良好的传输性能和低功耗特性，为进一步开展同步振动测量等高性能传感网应用奠定了良好基础。

关键词：无线传感器网络；高性能传感网；开源硬件；通用模块互联总线；OpenWSN

中图分类号：TP925 文献标识码：A

High performance 32 bit sensor network hardware platform design and developing

Shi Zhirong Jiang Lei Zhang Wei Zhu Jin Qiu Minjun

(Department of Control Science and Engineering, School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804)

Abstract : High performance wireless sensor network hardware is essential to scientific research and engineering practice. A new generation wireless sensor node design is proposed and implemented in this paper targeting at high performance applications such as distributed vibration measurements. It adopts the high-performance and low-power Cortex-M3 based STM32 microcontroller and the high-sensitivity wireless transceiver CC2520. In order to connect various potential measurement modules, a lightweight module level interconnect bus called MXB is also proposed to extend the core module functionalities. With the support of the open source OpenWSN software, a sensor network application can be easily established based on this hardware. The whole design follows the principle of low energy consumption, scalability, and low cost. The tests show that the node exhibit good transmission performance and will be good platform for high performance sensor network applications.

Keywords : wireless sensor network; high performance sensor network; open-source hardware; MXB; OpenWSN

^{*} 基金项目：国家自然科学基金资助项目（61004100）

0 引言

无线传感器网络技术融合了传感器、嵌入式计算、低功耗设计、近距离无线通信和自组织网络、分布式信息处理等技术,通过大量微型无线传感器的协作以实现智能感知并推动物理世界、计算世界以及人类社会三元世界的连通,它是整个世界走向自动化、智能化的感知前端,具有广阔的产业空间和应用潜力,在学术界和工业界都得到了高度重视^[1]。

无线传感器节点是组成无线传感器网络的基本硬件设备^[2]。灵活可扩展的高性能无线传感器网络硬件是支撑科学研究与工程实践必不可少的基础平台,特别是在超低功耗集成电路设计技术的支持下,以ARM Cortex系列为代表的低功耗高性能32位微控制器内核已经代替传统的8位机,成为承载传感网应用的理想平台,从而为更复杂算法在传感网中的研究与应用提供新的支持。传统的传感网平台如Mica^[3-4]、国内的GAINZ等都是以8位微控制器(如ATmega128L)为核心,这使得许多先进算法难以在真实硬件上实现,严重妨碍了对现有算法研究的实验与评价。即使是TI公司最新代产品的典型代表的cc2530系列芯片也仍构建在8位的8051内核基础上,中期的Telos^[5]平台^[6-7]采用16位MSP430作为核心处理芯片,使得软件开发所受限制减少。同期出现的Jennic平台^[8]首次采用

了32位微处理器JN513X,具有性能和开发方便的优势,但是传统的32位技术在动态和静态低功耗特性上均无法与设计良好的8/16位MCU芯片抗衡,这使得32位芯片在传感器网络领域并没有获得广泛使用。但32位芯片的低功耗技术进步很快,以Energy Micro公司的EFM32系列为代表的32位MCU已经达到180 μA/MHz和关机模式下20 nA的优秀性能,已能较好的满足许多传感网应用的需求。另一方面,传感网本身的复杂性也在提高,体现为软件的各种数据处理算法、网络协议与管理算法对处理平台的性能要求却在逐渐提高,这一矛盾在本文所陈述的32位OpenWSN开源硬件平台设计中得到较好解决。

本文以基于ARM公司Cortex-M3内核的32位高性能低功耗的微控制器芯片STM32F103和TI公司的高灵敏度2.4 GHz无线收发器CC2520为核心芯片,设计并开发了新一代高性能传感器网络硬件节点OpenWSN,并提供了符合自定义通用模块互联总线规范的外扩接口,以方便与各种传感器和外扩功能板连接,可为教学科研和工程提供便利支持。

1 无线传感器网络节点的系统架构

传感网应用要求无线传感器节点硬件平台达到以下几个要求^[10-12]:

1) 低功耗:硬件平台应当

为软件功耗管理提供支持,同时其本身也要遵循低功耗原则,最大限度降低动态功耗和静态功耗,以充分利用有限的电池电能。

2) 高可靠:由于无线传感器的应用中分布一般较广,维护成本相对较高,因此在硬件设计时就要求具有设计具有较高的鲁棒性和容错性。

3) 可扩展:在实际应用中,无线传感器节点需要灵活适用于不同的设计需求,所以应当设计出较为通用的接口,提高通用性和扩展性。

4) 低成本:由于在实际应用场合需要部署大量的传感器节点,所以成本控制成为了1个重要的考核依据,

5) 微型化:应用中的传感器节点要求高度集成化,体积应当尽量小,以方便部署于各个应用场合。

基于以上考虑,OpenWSN硬件平台在设计主要分为以下3大部分组成:

1) 核心板:是无线传感器的核心,包括微控制器、收发器和外扩存储器,负责数据采集、处理和通信,自成体系通电即可运行,可高度复用。

2) 基板:承载核心板并携带电源模块、编程接口、外扩总线接口等各种接插件以方便使用,以及各种直接部署在基板上的板载传感器。

3) 各种外扩功能板如测量子板。外扩功能板与基板间通过模块级互联总线(MXB)链接。

MXB 接口主要定义了 1 个传感器节点通用接口，负责与实际的传感器进行连接和通信。

这种“基本 + 核心板 + 外扩模块”设计方案，便于不同应用、不同级别的开发人员使用，完整的单节点系统架构如图 1 所示。

2 无线传感器节点核心板设计

OpenWSN 无线传感器节点由中央处理模块部分和无线收发模块部分组成。

2.1 中央处理模块

中央处理模块是无线传感器节点的控制管理核心，负责传感器数据采集、数据处理、网络通信与管理等核心功能。OpenWSN 节点设计采用 ST 公

司的 STM32F103 微控制器，它具有以下优点：1) 高性能：时钟频率最高可达 72 MHz，可显著提高无线传感器节点的数

据处理能力；2) 低功耗：时钟频率 72 MHz 时，从闪存执行代码，STM32 功耗 36 mA，相当于 0.5 mA/MHz 可通过降低

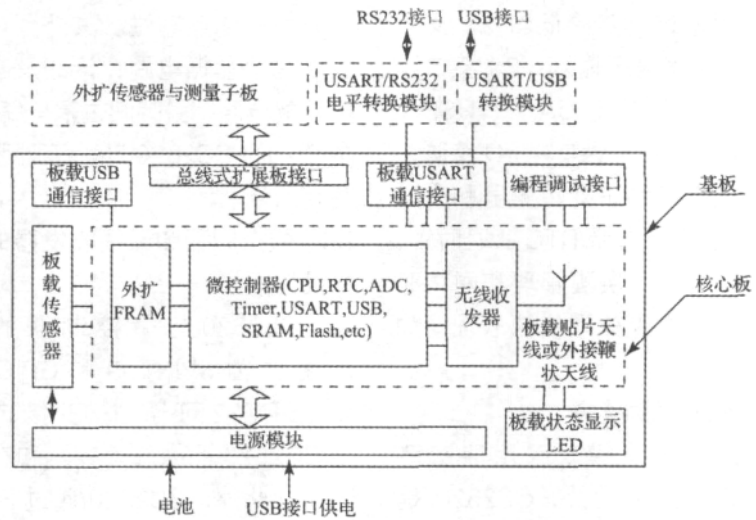


图 1 传感器节点组成

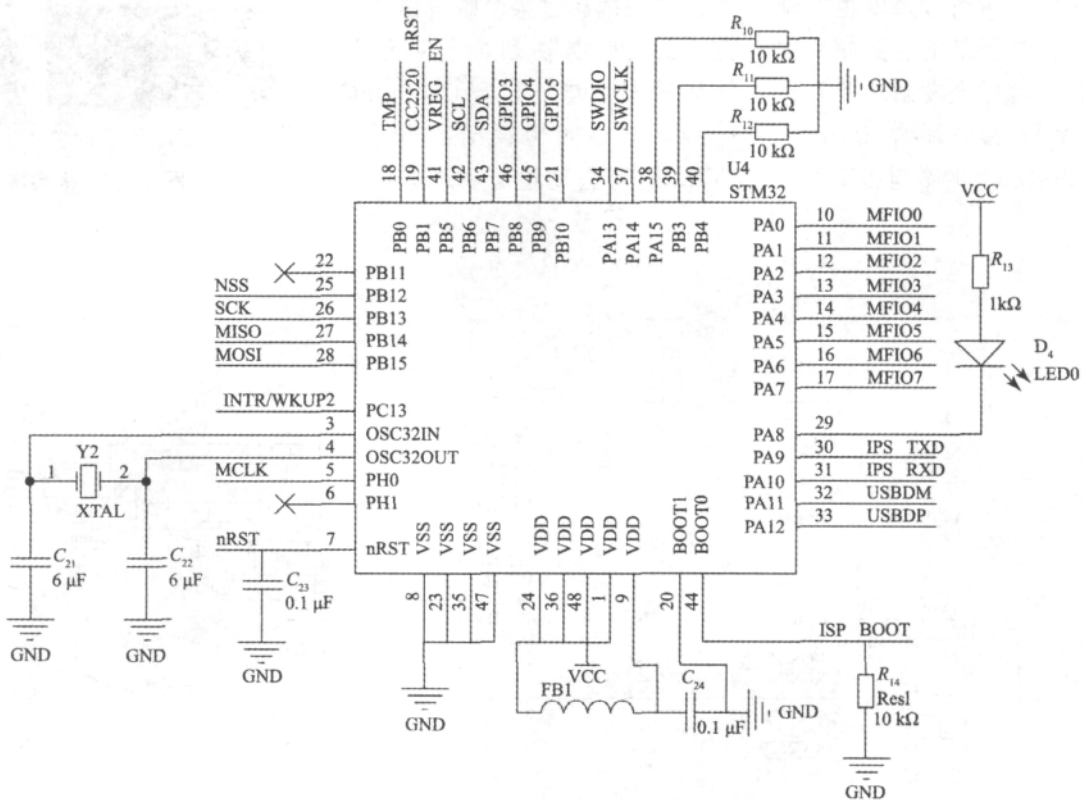


图 2 中央处理模块原理

工作频率进一步降低功耗。支持 2~3.6 V 宽电压输入；3) 接口丰富：提供 SPI、UART、USB、I²C 等接口和 5 V 兼容 I/O 管脚，便于连接各种工业传感器和变送器；4) 内部自带 RTC 实时时钟，方便了休眠 / 唤醒管理和网络时间同步。中央处理模块原理图如图 2 所示。

2.2 无线收发模块

无线收发模块采用 TI 公司的 CC2520 芯片，CC2520 是 ZigBee[®] / IEEE 802.15.4 RF 收发器，工作于 2.4 GHz 的 ISM 频段。CC2520 具有极好的灵敏度和共存性能，支持帧处理、数据缓冲、突发传输、数据加密、数据鉴权、空闲频道检测以及连接质量指示等，可有效降低主控制器的工作，利于节能。该芯片本身功耗较低，最大发射功率时电流约 30 mA，接收是约 20 mA，可支持 1.8~3.8 V 的宽电压输入，

具有良好的兼容性。其外围电路主要包括晶振电路、天线及其阻抗匹配电路、引脚间去耦电路等。本节点的 CC2520 部分原理图如图 3 所示。

2.3 微控制器和无线收发器的接口设计

CC2520 与微控制器的接口主要为 SPI 接口和 GPIO 接口。STM32 可通过 SPI 接口访问 CC2520 的内部寄存器和存储区域。此外，CC2520 通过 FIFO 和 FIFOP 引脚标识 FIFO 缓冲区的状态。如果内部接收 FIFO 缓冲区有数据，FIFO 引脚将输出高电平，若接收 FIFO 缓冲区下溢，那么 FIFO 引脚输出低电平。FIFOP 引脚在接收 FIFO 缓冲区的数据超过某个临界值或者在 CC2520 接收到 1 个完整的帧后输出高电平，当接收 FIFO 缓冲区下溢时也输出高电平。CC2520 可自动检测物理帧中的

SFD 帧开始标记，会在 SFD 引脚输出高电平，直到接收完该帧。而 CCA 引脚在信道有信号时输出高电平，它只在接收状态下有效。如果启用了地址辨识，在地址辨识失败后，SFD 引脚立即转为输出低电平。接口设计和核心板实物图如图 4、5 所示。

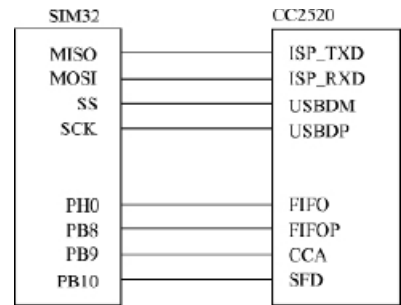


图 4 STM32 和 CC2520 接口

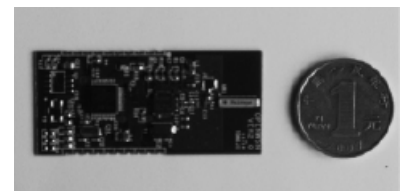


图 5 核心板实物

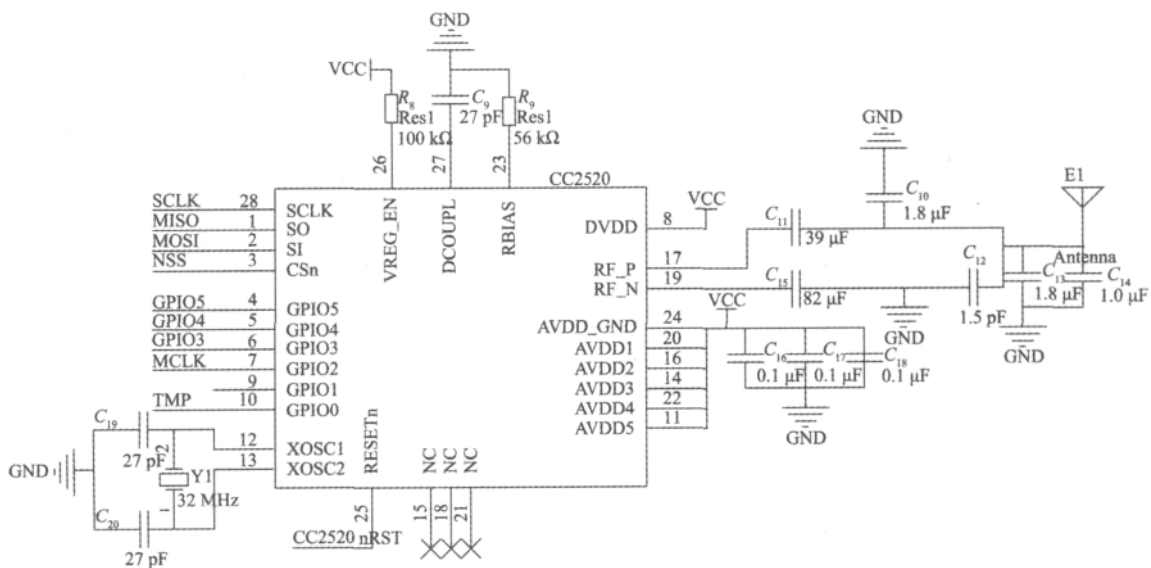


图 3 CC2520 原理

3 无线传感器基板设计

基板承载电源、传感器、各种接插件并与外壳适配，此外基板上提供了标准的外扩接口以方便第三方扩展。

3.1 节点布局和机械结构设计

综合考虑安装和机械布局设计通用节点方案如图6所示。

通用节点的设计包括无线传感器节点核心模块和节点基板2部分。无线传感器核心模块主要包括中央处理模块和无线收发模块，将此核心模块高度集成后，可方便的应用于不同的场合。节点基板则包括测试实验接口、电源模块和总线式接口等部分组成。测试实验接口包括为核心板编程所需要的JTAG接口和ISP接口，可与电脑等调试设备相连接的MiniUSB接口和串口以及显示设备状态所用的3个LED灯。测试实验接口可为OpenWSN无线传感器的实验提供所需的接口。总线式接口，即模块级互联总线，可为不同的测量传感器提供较好的支持，使得各类传感器可以方便的节点相连。

3.2 电源模块设计

由于无线传感器节点本身所需要的低功耗特点，电源模块设计在无线传感器节点设计中具有十分重要的作用，既要适应多种电压源和较宽的供电范围，如3V电池供电和5V工业电源供电，还要支持关断能力，且本身功耗要尽可能小^[13]。为此选用了CMOS LDO电源调节器SP6200，其主要特点是：具有

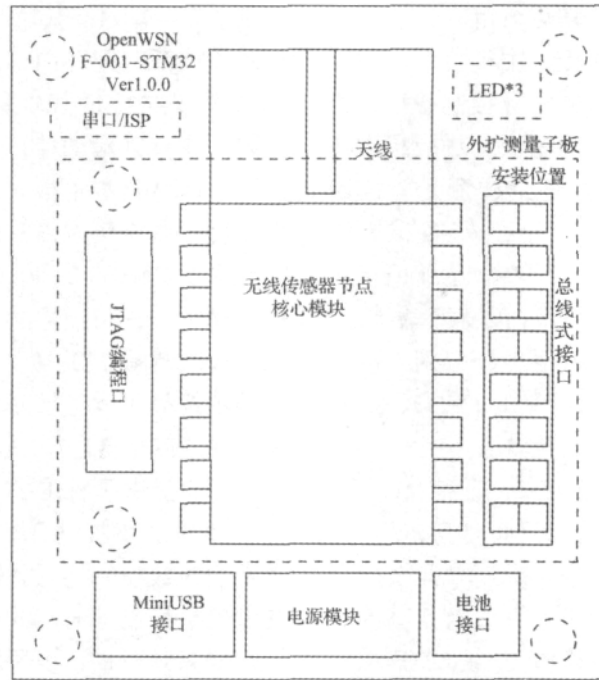


图6 无线传感器节点布局

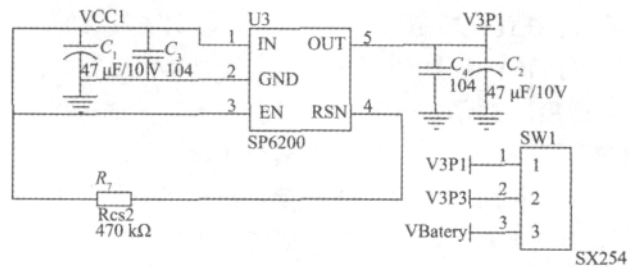


图7 OpenWSN核心板电源模块原理

极高输出电压精度，可达2%。低压差，在100mA时，仅需要160mV的压差即可正常工作。小型的DFN封装，满足无线传感器节点微型化的需求。OpenWSN核心板电源模块部分的设计原理图如图7所示。

3.3 总线式外扩接口设计

模块级互联总线主要定义了1个OpenWSN传感器节点的通用接口，负责与实际的传感器进行连接和通信。模块级

互联总线（lightweight module level interconnect bus, MXB）是相对于板级互联总线（board level, BXB）和芯片级互联总线（chip level, CXB）而言。板级互联总线BXB的典型代表是交换机中的背板总线、连接较远距离的4~20mA电流环等技术，而芯片级互联CXB的典型代表是SPI和I²C。MXB在使用中与I²C类似，但是可以支持更简单的模块。在MXB的应用场景中，

整个设备通常可分解为1块主板和多块扩展板，主板负责总控，是总线通信的实际控制模块，通常也就是处理器板。从板经常是I/O模块（如通信、测量、控制驱动模块）。OpenWSN核心板MXB接口定义具体如表1所示。

如表中所示，O表示输出，I表示输入。AI和AO分别为模拟输入和模拟输出，DI和DO则相应为数字输入及输出。

在MXB接口规范中，Pin 1~10为必须实现，11~20为可选实现。这是考虑到一些微控制器与核心板设计并没有足够的资源来实现完整的20线MXB总线规范，且1~10中提供的SPI接口、DIO接口和中断功能足以满足大多数扩展需求。在此接口定义中，Pin2~4保留了1个完整的SPI接口，用于连接外扩SPI模块，如更高性能更高精度的ADC，Pin6-9脚均由利用STM32的GPIO实现，其中Pin7可用于向扩展板提供CLOCK信号，Pin8用于提供复位输出，使得总控制板可以强行复位扩展从板，Pin9

是1个支持输入捕获功能的管脚，可触发中断，同时内部连接硬件计数器以支持捕获功能。Pin12主要是支持唤醒功能，用于子板唤醒休眠状态的主板时使用，在低功耗系统中可以发挥较好的节能作用。Pin13和Pin16为模拟输入功能，支持模数转换功能，允许输入范围在0~Vcc之间，这使得主控板可以直接对一些输出模拟量的传感器进行采样。Pin14和Pin15提供了标准的UART接口。Pin17引脚提供PWM功能，通常作为数模转换器，例如用于提供电机控制信号，同时，当子板需要高频时钟，也可由该引脚提供。Pin18和Pin19为标准的I²C接口，用于连接外扩的I²C模块。

设计MXB接口规范的主要目的在于，这样可以简化传感器模块的设计流程。将那些可被大量重复使用的单元电路设计为独立的子板或模块。在日后的无线传感器硬件平台开发中，只要外扩测量模块和核心板遵循MXB接口规范，即可实现连接。而本

文叙述的OpenWSN结点，只是符合MXB接口规范的一种参考实现。

4 硬件节点实验和评估

4.1 开发与实验环境

对于所设计开源传感器网络硬件平台OpenWSN核心板进行相关实验。实验的软件开发平台采用同济大学OpenWSN开源无线传感器网络软件^[14-15]。采用2个无线传感器节点进行相关实验，发射节点采用2节干电池供电，采用广播协议向外发射数据。另一节点则将发射节点的信息接收后通过串口发送出去。在实验中，我们将接收节点通过TTL转USB的转换器与计算机相连，将节点的串口Tx和Rx端分别和连接器相连，连接器的USB口则直接与计算机相连。随后使用串口调试助手在计算机上观察USB虚拟串口的数据接收情况。节点实物图以及节点与计算机的连接图如图8和图9所示。

表1 MXB引脚功能定义

Pin	Direction	Function	Pin	Direction	Function
1	O	VCC	20	O	AVCC
2	O	SPI-MOSI	19	I/O	I ² C-SDA
3	I	SPI-MISO	18	O	I ² C-SCL
4	O	SPI-CLK	17	O	AO
5	O	SPI-CS	16	I	AI
6	I/O	DIO	15	I	USART-RX
7	I/O	DIO (模拟 CLOCK)	14	O	USART-TX
8	O	DIO (模拟 RESET)	13	I	AI
9	I	INTR+CAPTURE	12	I	INT/WKUP
10	O	GND	11	O	AGND

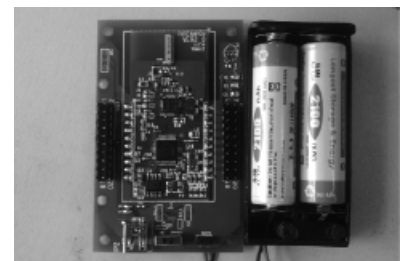


图8 节点实物

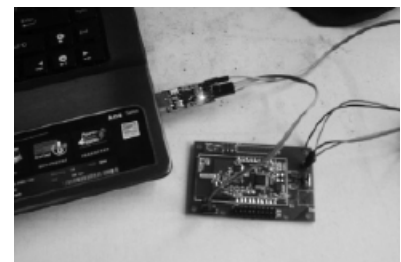


图9 节点实物与计算机连接

4.2 通信距离实验

在开阔环境和楼道环境中分别通过调节节点的发射功率，对其有效通信距离进行测试，测试结果如表2和表3所示。

表2 开阔环境中节点有效通信距离

发射功率 /dBm	有效通信距离 /m
5	122
0	79
-4	60
-7	51

表3 楼道环境中节点有效通信距离

发射功率 /dBm	有效通信距离 /m
5	95
0	68
-4	52
-7	46

实验表明，在开阔环境或楼道环境中，该节点可以有效传播较远的距离，并可通过调节发射功率对其传播半径进行有效的控制，为其后的拓扑构建提供了有力的支撑。

3.3 穿墙能力实验

穿墙能力测试是为了验证该节点在实际的楼宇环境中是否可以有效的组网工作。在功率为5 dBm时，在穿透约两堵水泥墙后，楼内传输距离大约可达20 m。

3.4 低功耗实验

低功耗实验室为了验证本硬件系统是否满足无线节点低功耗的设计需求。各种工作状态下功率如表4所示。

由于OpenWSN的软件设计^[13]中采用的是间歇工作状态，

表4 开阔环境中节点有效通信距离

工作状态	功率 /mW
发送状态	95.41
接收状态	89.90
无线收发模块关闭	40.89
系统待机	7.54

即工作与待机交替进行的工作模式，因此此功耗满足低功耗的设计需求。表中实测待机功耗仍然较高，达到了7.54 mW，这是由于测试节点采用的是常见STM32F103芯片，对休眠功耗要求苛刻的应用可用与之引脚完全兼容的STM32L系列对应低功耗芯片替换，休眠功耗将可以降低到mW级以下，更适合电池供电型应用。

5 结论

本文通过选用STM32作为微控制器、CC2520作为无线收发器设计了OpenWSN 1款开源传感器网络硬件平台，具有低功耗、低成本、高性能、扩展灵活的特点，特别是设计了模块级互联总线接口。实测表明，该硬件节点性能优于目前同类平台如Gainz、Mica、Telos等，很好地兼顾了高性能和低成本、低功耗和物联网方面的研究，如数据收集^[16]、无线调度^[17]和网关应用^[18]等，打下了坚实的基础。

参考文献

[1] SANKARASUBRAMANIAM A S. Wireless sensor networks : a survey [J]. Computer Networks , 2002 , 38 (4) : 393-422.
[2] RAMON P A , WEBSTER J G.

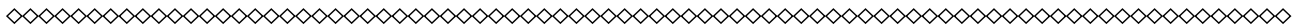
Sensors and signal conditioning [M]. 2nd Edition. Wiley Interscience.

[3] HILLAND J , CULLER D. Mica : a wireless platform for deeply embedded networks [J]. IEEE Micro , 2002 , 22 (6) : 12-24.
[4] Crossbow technology. MICA wireless measurement system datasheet [Z] . 2003 .
[5] POLASTRE J , SZEWCZYK R , CULLER D. Telos : enabling ultra-low power wireless research [C]. IPSN/SPOTS , 2005 : 364-369.
[6] 彭宇 , 罗清华 , 潘大为 . 一种无线传感器网络低功耗节点的设计 [J]. 计算机测量与控制 , 2009 , 17 (12) : 2571-2574.
[7] 赵泽 , 崔莉 . 一种基于无线传感器网络的远程医疗监护系统 [J]. 信息与控制 , 2006 , 35 (2) : 265-269.
[8] NXP Jennic [Z/OL]. <http://www.jennic.com/>.
[9] Energy micro [Z/OL]. <http://www.energymicro.com/>.
[10] POTTIE G J , KAISER W J. Wireless integrated network sensors [J]. Communications of the ACM , 2000 , 3 (5) : 512-518.
[11] HILL J , HORTON M , KLING R. The platforms enabling wireless sensor networks [J]. Communications of the ACM , 2004 , 47 (6) : 41-46.
[12] VIEIRA M A , COELHO C N , DA-

- SILVA D C. Survey on wireless sensor network devices[C]. ETFA ' 03, 2003, 1 (1) : 537-544.
- [13] 张晶晶, 王建明. 于 AT86RF212 芯片的无线传感器网络节点的设计 [J]. 电子测量技术, 2010, 33 (7) : 125-128.
- [14] OpenWSN 开源智能感知网平台 [Z/OL]. <http://openwsn.googlecode.com/>.
- [15] 张伟, 赵霞, 王祝萍, 等. 时间驱动的深度嵌入型智能感知网操作系统分析与设计 [J]. 计算机研究与发展, 2011, 48 (sl) : 7-13.
- [16] 史久根, 胡小博, 高效节能的无线传感器网络数据收集协议 [J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(5) : 437-445.
- [17] 底欣, 张百海. 一类异类无线传感器网络节点调度问题研究 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32 (6) : 1364-1370.
- [18] 张单群, 李斌. 基于 ARM 的无线传感器网络网关设计 [J]. 国外电子测量技术, 2010, 29 (5) : 60-62.
- 主要研究方向为无线传感器网络及其应用。
- 蒋磊, 男, 1980 年生, 同济大学电子信息与工程学院实验员。
- 张伟, 男, 1975 年生, 博士, 中国计算机学会会员, 同济大学电子信息与工程学院, 副教授。主要研究方向为传感器网络和复杂网络。
- 朱劲, 男, 1958 年生, 同济大学电子信息与工程学院, 副教授。主要研究方向为机器人与智能系统, 工业控制网络。
- 邱骏, 男, 1987 年生, 同济大学电子信息与工程学院在读研究生。

作者简介

侍智融, 男, 1988 年生, 同济大学电子信息与工程学院在读研究生。



(上接第12页)

- [2] 文香稳, 潘明华, 朱国力. 倾角仪特性研究及其测量误差补偿 [J]. 传感器与微系统, 2011, 30 (3) : 84-86.
- [3] 刘永, 张立毅. BP 和 RBF 神经网络的实现及其性能比较 [J]. 电子测量技术, 2007, 30 (4) : 77-80.
- [4] POPOVICIU N, BONCUT M. A complete sequential learning algorithm for RBF neural networks with applications[J]. WSEAS Transactions on Systems, 2007, 6 (1) : 24-31.
- [5] 俞阿龙. 基于 RBF 神经网络的热敏电阻温度传感器非线性补偿方法 [J]. 仪器仪表学报, 2007, 28 (5) : 899-902.
- [6] ZHENG X L, FU J Q. Performance compensation of GMR-based magnetic azimuth measurement system [C]. 24th IEEE Chinese Control and Decision Conference, 2012 : 3273-3276.
- [7] ROY A, GOVIL S, MIRANDA R. A neural network learning theory and a polynomial time RBF algorithm [J]. IEEE Trans. on Neural Network, 1997, 8 (6) : 1301-1313.
- [8] YU Z, JING Y Y, XIE Y B, et al. Applying radial basis function neural network to data fusion for temperature[C]. IEEE International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2006 : 3177-3180.
- [9] ZHENG X L, FU J Q. Performance compensation of GMR-based magnetic azimuth measurement system [C]. 24th IEEE Chinese Control and Decision Conference, 2012 : 3273-3276.
- [10] LIANG NY, HUANG GB, SARATCHANDRAN P, et al. A fast and online sequential learning algorithm for feedforward networks [J]. IEEE Trans. on Neural Networks, 2006, 17 (6) : 1411-1423.
- [11] YU Z, JING Y Y, XIE Y B, et al. Applying radial basis function neural network to data fusion for temperature[C]. IEEE International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2006 : 3177-3180.
- 作者简介
- 吴艳, 女, 1987 年出生, 工学硕士, 主要研究方向为控制技术与智能算法等。
- E-mail: wuyanzi0403@163.com