

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208865

舱内低功耗无线传感网络系统设计*

马游春^{1,2} 李晋芳^{1,2} 李超杰^{1,2} 叶恩楠^{1,2}

(1. 中北大学电子测试技术国家重点实验室 太原 030051; 2. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

摘要: 在火箭参数测量系统中,传统的传感网络使用电缆进行连接,随着测试点的增加,大量缆线的使用不仅带来了多余的负载和功耗,而且还占用了大量的舱内空间,为火箭舱内其他设备的布局 and 安装造成巨大的困扰。针对上述问题,提出了一种基于 CC1310 的无线传感网络(WSN)设计方案,实现测试系统无缆化。该设计选用通信频段低于 1 GHz(Sub-GHz)的超低功耗射频芯片 CC1310 作为传感网络控制器,使用低功耗的 K 型热电偶 AD8495 实现温度数据的采集,使用锂电池为传感器节点供电。软件设计实现了传感器节点周期性休眠和唤醒侦听机制,主节点轮询访问传感器节点获取状态和数据的功能,完成了传感器节点低功耗设计并且数据的可靠性可以得到保证。经试验测试,该系统设计合理,具有功耗低、数据传输稳定可靠等显著特点,且系统在组网后工作状态平均能耗为 88 μA ,可实现火箭舱内环境参数的长期测量。

关键词: CC1310;低功耗;无线传感网络;数据采集;Sub-GHz

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Design of low-power wireless sensor network system in cabin

Ma Youchun^{1,2} Li Jinfang^{1,2} Li Chaojie^{1,2} Ye Sinan^{1,2}

(1. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrument Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In the launch vehicle parameter measurement system, the traditional sensor network is connected by cables. With the increase of test points, the use of a large number of cables not only brings excess load and power consumption, but also takes up a lot of cabin space, causing huge trouble for the layout and installation of other equipment in the rocket cabin. In response to the above problems, we propose a CC1310-based wireless sensor network (WSN) design scheme to realize the cableless test system. In this design, the ultra-low-power RF chip CC1310 with a communication frequency band below 1 GHz (Sub-GHz) is selected as the sensor network controller, the low-power K-type thermocouple AD8495 is used to collect temperature data, and the lithium battery is used for power supply. The software design implements the periodic sleep and wake-up listening mechanism of sensor nodes, and the master node polls and accesses sensor nodes to obtain the function of status and data. The node low power consumption design is completed and the reliability of the data can be guaranteed. The experimental test shows that the system has a reasonable design, low power consumption, stable and reliable data transmission, and the average energy consumption of the system in working state is 88 μA , which can realize long-term measurement of environmental parameters in the rocket cabin.

Keywords: CC1310;low power consumption;wireless sensor network;data acquisition;Sub-GHz

0 引言

运载火箭内部温度、压力、湿度等参数的测量可以精确监测火箭整体状态^[1],传统的测量系统通过有线方式连接,

即使用电缆连接传感器和主控系统以实现数据的传输。但是随着新兴技术的发展,传统有线传输方式的弊端不断凸显,线缆沉重、整体功耗大、挤占舱内空间等缺点迫使测量系统加速更新。

收稿日期:2022-01-17

* 基金项目:微纳传感器信号无线引出及测量仪器研制项目(2018YFB0003)资助

随着物联网技术的飞速发展,无线传感网络开始进入人们的视野并将其运用到各个领域。相比于传统的有线传输方式,无线传感网络有着布置灵活、可扩展性强、维护成本低等特点,应用于运载火箭舱内参数测量系统中还可以减少电缆的使用,减轻火箭负载,加快研制进度^[2,3]。

目前,搭载使用无线传感网络的运载火箭中,使用较多的是 UWB 技术和 ZigBee 技术^[1]。UWB 技术使用定制的协议进行通信,传输速率远远大于其他方式,有着低延迟、高吞吐量的优点,但是 UWB 技术功耗可以达到 1 mW,电池供电无法满足长时间的工作要求,因此其节点仍然使用电缆供电。ZigBee 技术作为相对成熟的无线网络技术^[5],拥有高安全性和高灵活度的优点,但是其缺点也较明显,该协议使用的网状网络拓扑结构不仅制约了传输速率,而且复杂的协议也提高了开发难度,在运载火箭背景下并不是最合适的选择。

在多种组网技术中,Sub-GHz 技术和 ZigBee 技术的基础都是 IEEE 802.15.4 标准,均可以做到低功耗和较强的抗遮挡能力。但是,Sub-GHz 技术具有更强的穿墙能力,更加适用于舱内多障碍物的复杂电磁环境中,且与 ZigBee 技术相比,还优化了低功耗的短期数据突发,并且可以根据需求进行自定义协议的编程,实现其特定功能。因此在组网技术方面选用 Sub-GHz 技术进行无线传输^[6]。

1 传感网络整体设计

由于运载火箭舱内体积有限,无线传感网络的节点密度较低,该设计使用星型拓扑结构足够保证链路的可靠性。无线传感网络由一个主节点和多个从节点构成,从节点分布在待测环境参数处,与传感器一起作为传感器节点;主节点作为集中器处于星形网络中心^[7]。主节点主要功能为传感网络的组网实现、通过控制命令对从节点进行状态控制以及轮询接收从节点环境参数的传输;从节点主要功能是在加入网络后,负责对主节点射频命令侦听和状态转换,最后将传感器采集到的数据进行无线发射。传感网络整体设计如图 1 所示。

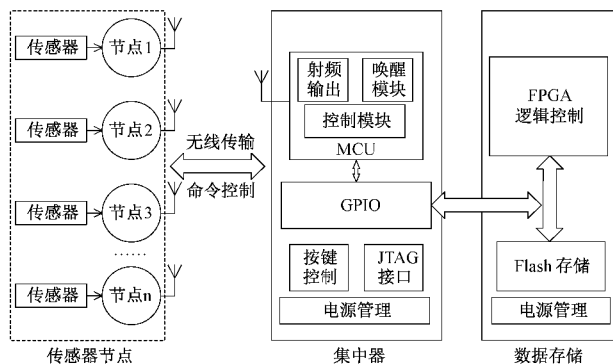


图 1 传感网络整体设计

2 硬件电路设计

2.1 射频芯片电路设计

考虑到特殊的应用背景,无线射频芯片需要考虑小型化与低功耗的需求,除此之外,舱内复杂环境和信号的干扰同样需要克服。经过多次筛选,最终选择了德州仪器公司的 CC1310 芯片作为射频芯片。它具有集成度高、体积小等特点,拥有完整的射频系统和高度集成化等优势:1)内部集成了 12 bit 的 ADC 和 8 通道模拟多路复用器,可以有效减少器件尺寸;2)超低功耗射频收发器可以实现 Sub-GHz 的射频传输,且低频网络的物理特性具有更好的绕射性;3)CC1310 内部集成了一个射频管理核 Cortex-M0,独立于 Cortex-M3 微处理器工作,当设备处于待机状态下,电源电流降至小于 1 μ A。4)拥有丰富的外设,可以根据需要灵活的使用 I2C、SPI、UART 等配置。

2.2 传感器电路设计

传感器同样考虑小型化与低功耗的需求。本设计实现对舱内的环境参数进行测量,以舱内温度作为测量对象,传感器选择了 K 型热电偶 AD8495^[8]。该温度传感器使用小型 MSOP 封装,单端宽供电范围 2.7~36 V,温度测量范围可达 -25 $^{\circ}$ C~+100 $^{\circ}$ C,且输出误差优于 $\pm 5\%$,同时还具有功耗小于 1 mW(5 V 供电)的特点,完全满足设计要求。

3 传感网络设计

传感网络的构建基于 TI-RTOS 操作系统实现,通过构建多个实时任务来处理多优先次序的进程,使得在限制时间内完成不同优先级任务,最终实现传感网络的搭建、节点轮询控制和数据采集等功能。传感网络的软件设计包括主节点设计、从节点设计、和传感数据存储设计 3 个方面。

3.1 集中器节点设计

集中器节点设备上电启动后,可以自行建立网络,并成为网络的集中器,独立于其他同时在其周围运行的星形网络,并允许其他节点可以加入网络。

在网络构建前,集中器节点上电启动后首先会进行硬件初始化,启用低功耗电源管理策略和 BIOS 内核。然后,打开射频功能并配置射频通信频率为 915 MHz,射频开始自动扫描信道且选择最少干扰的信道^[9]。

网络创建完成后,传感器节点设备可以通过发送入网包请求加入网络。当集中器节点成功收到入网包后,会解析包结构并将其包内的传感器节点的 MAC 地址保存并按照顺序分配一个短地址,然后返回一个周期性休眠等待控制的命令。

如图 2 所示,在组网完成后,当集中器节点有控制命令输入时,首先会判断其命令内容,然后通过不同的命令控制特征字和不同的命令内容向已经保存的传感器节点地址发送命令控制信息。当执行采集命令时,集中器节点射频通信设置为异步非阻塞监听,使用轮询的方式向传感器节点

发送控制命令并等待数据的汇报;集中器节点收到数据后,会对数据包中的短地址和命令控制特征字进行判断,如果数据无误,则返回一个 ACK,表明数据传输完成,否则会将数据丢弃并返回一个数据异常的命令,等待数据的重传。

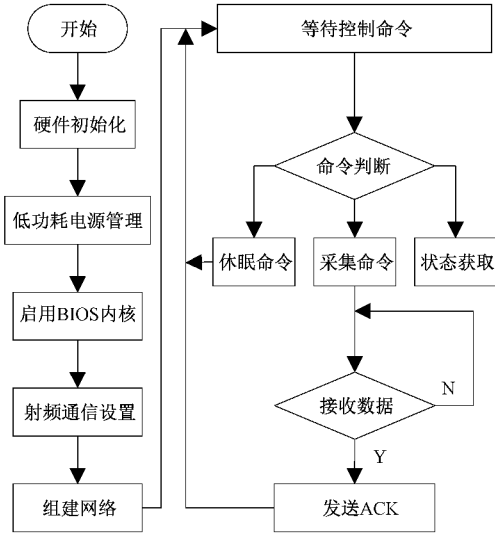


图 2 集中器节点软件设计

3.2 传感器节点设计

传感器节点在上电时同样伴随硬件的初始化、启动低功耗电源管理和 BIOS 内核的启动。与集中器节点不同的是,传感器节点在供电设计方面使用电池供电,所以在成功加入网络后,为了控制从节点的功耗,会进入休眠状态以降低功耗,然后周期性的唤醒来侦听来自集中器节点命令。

如图 3 所示,当接收到采集命令后,传感器节点被唤醒并进入工作状态,使用内部 ADC 对热电偶传感器的模拟电压进行采样;采样完成后,传感器节点会先对信道进行评估,避免出现同频干扰的情况,然后才会发送有效数据;最后等待 ACK 返回值,表明一包数据传输成功,否则会进行数据重传。随后传感器节点再次进入休眠侦听状态,以减少整体功耗。

在数据传输过程中,随着传感器节点的增多或者是其他干扰信号的存在,会出现数据包的重传。数据包重传的机制是通过轮询的时间间隙来实现,避免出现同频干扰的情况,导致整个网络系统瘫痪。重传机制使用载波监听多点接入/碰撞检测(CSMA/CA)对集中器节点的信道进行评估^[10-11]。在开始传输前,启动基于内部后退计数器运行的内部设备 MAC 层,每个设备随机选择后退并倒计时,并一次传输结束后清除,这就使得不是所有传感器节点同时开始传输。这种自适应机制使网络能够动态地适应实际负荷和网络需求,使碰撞量最小化。

3.3 传感器数据存储设计

随着传感器数目的增加,集中器收到的数据量会逐渐增大,为了数据处理和存储更加快速可靠,使用 FPGA 进

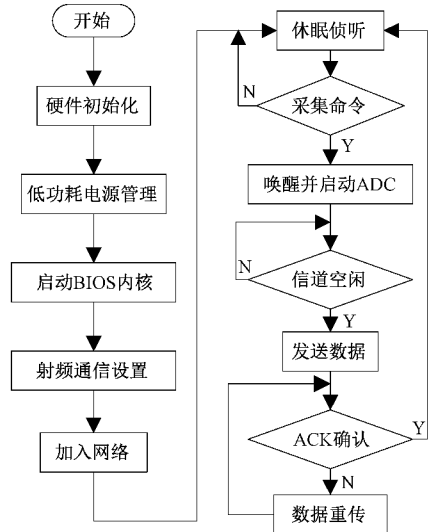


图 3 传感器节点工作流程设计

行控制^[12]。集中器节点收到来自节点的数据包格式如表 1 所示。

表 1 集中器接收数据包结构

| 包类型 | 节点编号 | 目标地址 | 传感器类型 |
|--------|--------|--------|--------|
| 1 byte | 1 byte | 1 byte | 1 byte |
| 包计数 | 报告时间 | MAC 地址 | 传感器数据 |
| 2 byte | 2 byte | 8 byte | 2 byte |

在数据存储至 Flash 时,为减少无用数据占用存储空间,简化存储帧结构。每一帧数据结构包括帧头、节点编号、MAC 地址和传感器数据组成,其中包计数为辅助判断误码率的依据,如果发生误码现象,则存储数据将填充 0xFFFF。

4 试验测试

4.1 功能测试

系统平台的搭建是由 3 个传感器节点和一个集中器节点组成,由于 CC1310 可以支持不同速率的传输方式,本系统中每个传感器节点传输的数据量较小,因此将其射频配置为 2 GFSK-50 Kbps,且将传感器节点报告时间设置为 1 次/s。

为了测试无线传感网络系统的链路情况,使用芯片内部通信基带接收数据时得到的 RSSI (received signal strength indicator) 进行判断^[13]。传感器节点与集中器节点的距离不断增大,系统的链路情况如图 4 所示。在实际情况中,一般认为 RSSI < -75 dBm,则有可能引起传输不稳定。当传输距离为 15 m 时,RSSI 值约为 -73 dBm,链路质量良好;当距离大于 25 m 时,RSSI 值减小至 -90 dBm 左右,网络质量差。当距离大于 30 m 时,网络断开。因此可以判断在 15 m 范围内,可以确保无线传感网络系统的链

路稳定性。考虑到运载火箭舱内的空间大小,以集中器节点作为星形网络中心,15 m 半径内足够保证链路稳定性。

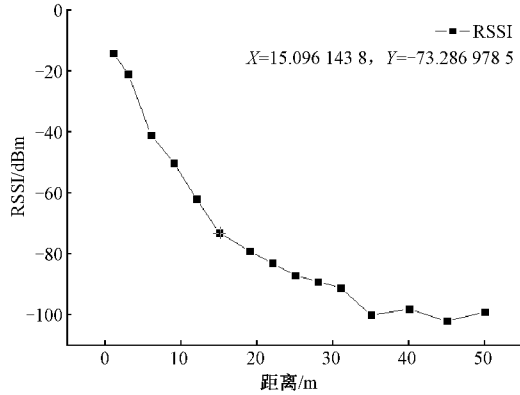


图 4 RSSI 通信链路测试

为测试无线传感网络系统基本功能,试验将三个传感器节点分别放置在室外、热水中和室内,距离集中器节点 10 m 半径的区域内,并且传感器节点与集中器节点之间存在墙壁、家具等遮挡物的存在。系统持续工作 1 h 后将 Flash 中存储的数据读出,得到了如图 5 所示的数据。将帧头 EB90 对齐后,得到结构为传感器节点编号、MAC 地址和温度的数据,温度数值处理后分别为 9.41 °C、51.19 °C 和 26 °C,同实际温度比较,完全符合实验预期结果。

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 00 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 0A | 0B | 0C |
| 0034: | EE | 90 | 03 | 4D | C0 | CD | 12 | 00 | 4B | 12 | 00 | 1A | 02 |
| 0041: | EE | 90 | 01 | 0D | F3 | 27 | 0A | 00 | 4B | 12 | 00 | 09 | 16 |
| 0042: | EE | 90 | 02 | 9D | 23 | CE | 12 | 00 | 4B | 12 | 00 | 33 | 14 |
| 005B: | EE | 90 | 03 | 4D | C0 | CD | 12 | 00 | 4B | 12 | 00 | 19 | FE |
| 0068: | EE | 90 | 01 | 0D | F3 | 27 | 0A | 00 | 4B | 12 | 00 | 09 | 28 |
| 0075: | EE | 90 | 02 | 9D | 23 | CE | 12 | 00 | 4B | 12 | 00 | 33 | 13 |
| 0082: | EE | 90 | 03 | 4D | C0 | CD | 12 | 00 | 4B | 12 | 00 | 1A | 01 |
| 008F: | EE | 90 | 01 | 0D | F3 | 27 | 0A | 00 | 4B | 12 | 00 | 09 | 29 |
| 009C: | EE | 90 | 02 | 9D | 23 | CE | 12 | 00 | 4B | 12 | 00 | 33 | 13 |
| 00A9: | EE | 90 | 03 | 4D | C0 | CD | 12 | 00 | 4B | 12 | 00 | 1A | 00 |
| 00B6: | EE | 90 | 01 | 0D | F3 | 27 | 0A | 00 | 4B | 12 | 00 | 09 | 2B |
| 00C3: | EE | 90 | 02 | 9D | 23 | CE | 12 | 00 | 4B | 12 | 00 | 33 | 12 |
| 00D0: | EE | 90 | 03 | 4D | C0 | CD | 12 | 00 | 4B | 12 | 00 | 1A | 01 |
| 00DD: | EE | 90 | 01 | 0D | F3 | 27 | 0A | 00 | 4B | 12 | 00 | 09 | 2A |
| 00EA: | EE | 90 | 02 | 9D | 23 | CE | 12 | 00 | 4B | 12 | 00 | 33 | 15 |
| 00F7: | EE | 90 | 03 | 4D | C0 | CD | 12 | 00 | 4B | 12 | 00 | 1A | 00 |
| 0104: | EE | 90 | 01 | 0D | F3 | 27 | 0A | 00 | 4B | 12 | 00 | 09 | 2A |
| 0111: | EE | 90 | 02 | 9D | 23 | CE | 12 | 00 | 4B | 12 | 00 | 33 | 13 |

图 5 读取温度数据

为了测试无线传感网络系统的数据传输稳定性,在工作 20 h 后,将 Flash 中保存的数据导出并解析,统计数据误码次数,并计算系统的丢包率。结果如表 2 所示,系统误码率远小于 1%,可保证数据传输稳定可靠。

表 2 数据包误码数

| | | | | | |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 工作时长/h | 1 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| 丢包率/% | 0.079 | 0.081 | 0.076 | 0.077 | 0.075 |

4.2 功耗测试

系统中传感器节点供电方式是电池供电,因此在功耗测试中主要测试对象为传感器节点的功耗。入网前的主要功耗为发送入网包,此阶段功耗较小,且持续时间很短;入

网后的主要功耗为周期性的休眠和唤醒侦听功耗。这两部分的功耗比较固定,因此功耗测试主要针对传感器节点数据采集和发送时的功耗情况,其主要功耗分为三部分:休眠功耗、数据发送功耗和数据接收功耗^[11-15]。为了简化测试流程,使用一个传感器节点与集中器组网,传感器节点使用 3.3 V 的电压源供电,最后延长休眠、接收控制命令数据和发送传感数据的 3 个状态的工作时间,单独测试某一输出的总电流大小。表 3 为各状态下平均电流消耗。

表 3 不同状态下平均电流能耗

| 工作状态 | 休眠状态 | 发送状态 | 接收状态 |
|------|-------|---------|--------|
| 延时时间 | 10 s | 20 s | 20 s |
| 平均能耗 | 30 μA | 16.3 mA | 7.8 mA |

在正常工作一个周期内,传感器节点需要接收一帧轮询命令(18 字节)、发送一帧传感器数据(18 字节)和接收一帧 ACK 返回值(15 字节)。因此工作一个周期内发送状态消耗时间为:

$$T_{tx} = \frac{18 \times 8 \text{ bit}}{50 \text{ Kbps}} = 2.88 \text{ ms}$$

工作一个周期内接收状态消耗时间为:

$$T_{rx} = \frac{18 \times 8 \text{ bit}}{50 \text{ Kbps}} + \frac{15 \times 8 \text{ bit}}{50 \text{ Kbps}} = 5.28 \text{ ms}$$

报告时间 T 为 1 s 时的平均能耗为:

$$I = \frac{T_{tx} \times I_{tx} + T_{rx} \times I_{rx} + T_{sleep} \times I_{sleep}}{T} \approx 0.088 \text{ mA}$$

对于低功率广域网络,系统在组网后工作状态平均能耗为 88 μA,以使用两节 7 号干电池供电(2×600 mAh)为例,理论上可以使用 18 个月以上,完全可以满足背景需求。且在实际应用中,从节点休眠时间更长,对功耗的需求会进一步降低。

5 结 论

本文针对箭载舱内环境参数的测量设计了低功耗无线传感网络系统。在硬件方面使用小型化、低功耗热电偶作为温度传感器,使用高集成度、低功耗的 CC1310 芯片为组网射频芯片;在软件方面,在操作系统上完成了无线传感网络的构建,利用采样周期性唤醒的休眠侦听机制降低系统功耗,使用集中器节点轮询的方式增强数据可靠性,并使用 CSMA/CA 避免数据重传时出现同频干扰情况。通过试验证明,该系统设计合理,数据传输稳定可靠,功耗低,满足设计需求,同时在工业抄表等其他行业也有着巨大的应用价值。但系统仍然需要进行改进,未来需要对传感器节点多路模拟信号量的获取和传输速率进行深入研究。

参考文献

[1] 张永杰,胡斌,李雷,等. 运载火箭整流罩内环境无线测量系统研究[J]. 电子测量技术,2017,40(11):213-216.

- [2] 王国辉,张金刚,耿胜男,等. 运载火箭新一代测量系统发展设想与关键技术分析[J]. 宇航总体技术,2020,4(1):1-7.
- [3] 我国首次实现运载火箭测量系统传感系统无线传输[J]. 传感器世界,2018,24(6):42.
- [4] 罗煜缤,李洪,周广铭,等. 新一代箭载无线传感器网络系统架构综述[J]. 宇航计测技术,2020,40(4):1-6.
- [5] 朱振才,张晟宇,胡海鹰. 分布式空间系统组网技术综述[J]. 航天器工程,2018,27(6):77-83.
- [6] 朱志斌. 基于 CC1310 的无线传感网络记录仪设计[D]. 太原:中北大学,2021.
- [7] 孙伟,李鹏宇,杨建平,等. 配电泛在物联网无线通信链路可靠性的置信区间预测[J]. 电子测量与仪器学报,2020,234(6):32-40.
- [8] 黄小兵. 基于 CC1310 低功耗长距离网络设计与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [9] 冯笑晨,邵壮,文玉梅,等. 利用 Wi-Fi 信道的超低功耗无线传感系统[J]. 仪器仪表学报,2021,42(9):131-140.
- [10] 黄焯赫,姚晓东,齐亮. 基于 LPWA 网络的海上风电结构健康数据采集系统[J]. 仪表技术与传感器,2020(10):84-88.
- [11] 韩雨龙,薛志超,文丰. 低功耗热电偶无线传感器节点设计与实现[J]. 电子测量技术,2020,43(15):131-136.
- [12] 崔思阳,彭泳卿,徐辉. 适用于火箭环境监测的无线传感网络应用研究[J]. 计算机测量与控制,2019,27(9):278-282.
- [13] 张利威,郭涛,周天浩,等. 箭载力学信号的无线采集系统[J]. 兵器装备工程学报,2019,40(3):232-235.
- [14] 高翔霄,俞达,任月慧,等. 无线传感器网络数据传输延时分配算法[J]. 计算机测量与控制,2020,28(5):258-262.
- [15] 高欣,何汇成,邹杰,等. 短距离无线传感网络传输链路性能评估硬件设计与试验[J]. 国外电子测量技术,2021,325(12):50-55.

作者简介

马游春(通信作者),副教授,博士,主要研究方向为微测试计量技术及仪器、光纤光栅传感技术。

E-mail:798965939@qq.com

李晋芳,硕士研究生,主要研究方向为测试计量技术及仪器、电路与系统。

E-mail:1075455850@qq.com