

一种能量可计算的星型无线传感器网络协议

陆游¹, 禹素萍¹, 姜华², 吴波²

(1. 东华大学 信息科学与技术学院, 上海 201620; 2. 中国科学院 上海高等研究院, 上海 201210)

摘要: 提出一种基于双向通信的无线传感器网络的超低功耗协议. 通过分析协议的防碰撞原理, 给出了网络参数的设计原则, 以及传感器节点功耗与传感器网络寿命的关联算法, 并通过 OMNeT++ 网络仿真软件对协议进行了仿真验证. 结果表明: 该方法通过降低协议的复杂度, 控制网络的工作流程, 有效降低了整个无线传感器网络的能耗, 延长了网络的使用寿命, 并实现了预测无线传感器网络的寿命.

关键词: 无线传感器; 星形拓扑网络; 超低功耗; 防碰撞; 寿命预测; OMNeT++

中图分类号: TN919.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-024X(2013)04-0060-06

An energy-calculable star wireless sensor network protocol

LU You¹, YU Su-ping¹, JIANG Hua², WU Bo²

(1. Information Science and Technology College, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Science, Shanghai 201210, China)

Abstract: An ultra-low-power protocol is proposed for wireless sensor network based on two-channel communication. By analyzing the anti-collision theory of the protocol, the design principles of the network parameters are given. It shows the association algorithm between power consumption of the sensor node and the lifetime of sensor network, and this algorithm is validated by the network simulation software named OMNeT++. The result shows that by reducing the complexity of the protocol and controlling the working process of the network, it can reduce the energy consumption, extend the life of the entire wireless sensor network, and forecast the lifetime of wireless sensor network.

Key words: wireless sensor network; star network topology; ultra-low-power; anti-collision; lifetime forecast; OMNeT++

无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)的应用范围相当广泛, 已成功地应用到环境监测、农业和医疗卫生行业等. 不同应用环境的要求差异也很大, 需根据具体情况设计合适的网络协议. 其中, 网络拓扑结构主要描述的是网络节点间的连接方式, 基本类型有: 总线型、环型、树型、ad hoc 型以及星型^[1]. 目前无线传感器网络协议基本都是根据具体情况进行研究设计, 而降低功耗、提升无线传感器网络的使用寿命一直是当下的一个研究热点. 但是到目前为止还没有一种通信协议能够满足所有无线传感器网络的应用要求, 在有些特殊情况下这些协议下的传感器节点不能满足低功耗的要求, 即无线传感器网络的使用寿命不能达到要求. 星型拓扑网络是各种网络的组网基础, 它具有控制简单、便于管理、建网容易等特点,

在传输距离较近、环境干扰大、时间要求高、数据量大等工业现场应用较为广泛^[2]. 使用星型拓扑建立无线传感器网络可以降低通信协议的复杂度, 有效地降低整个网络的能耗. 本文选择星型无线传感器网络, 讨论一种基于双通道的无线传感器网络通信协议, 降低了协议复杂度, 实现星型无线传感器网络的超低功耗以及传感器节点的功耗可计算、无线传感器网络的寿命可预测, 并使用 OMNeT++ 网络仿真软件对所设计的协议进行仿真验证.

1 星型无线传感器网络的拓扑结构

星型无线传感器网络的拓扑结构如图 1 所示, 包括若干个传感器节点(Sensor)和一个基站节点(Sink).

收稿日期: 2013-02-22 基金项目: 上海市科委专项课题基金资助项目(09DZ1502100)

第一作者: 陆游(1989—), 男, 硕士研究生.

通信作者: 禹素萍(1977—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师. E-mail: yusuping@dhu.edu.cn

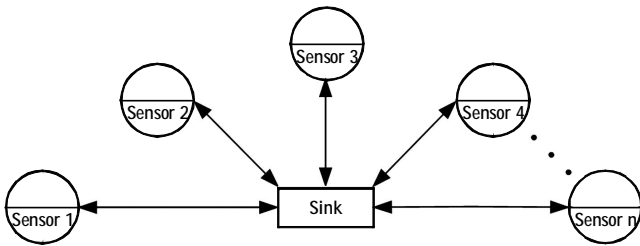


图 1 星型无线传感器网络拓扑结构

Fig.1 Star wireless sensor network topology

每个基站节点 Sink 可以管辖 n 个传感器节点 Sensor 1、Sensor 2、 \dots 、Sensor n ，它们随机地分布在基站节点可接收到信号的距离范围之内，与基站节点直接通信构成星型拓扑网络。基站节点协调整个网络的运行，从所管辖的传感器节点端接受数据，并通过其他方式传送至服务器端或主干网络上，所以基站节点需提供充足的能量。

2 无线传感器节点的低功耗硬件实现

无线传感器节点(Sensor)具有感知、计算和通信能力，通常是一个嵌入式系统，但是受到体积、电源、功耗等因素的限制，其数据处理能力、存储能力以及通信能力都相对较弱。传感器节点硬件结构如图 2 所示，由传感器部分、微处理器、存储部分、通信部分和电源部分组成。

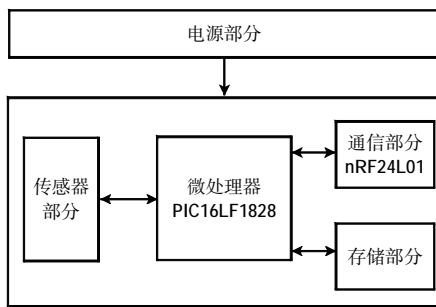


图 2 传感器节点系统结构图

Fig.2 Sensor node's system structure diagram

本设计中微处理器选用的是 Microchip 公司推出的一款 8 位超低功耗单片机 PIC16LF1828，其工作电压为 1.8~3.6 V，并且采用了 nanoWatt XLP 的超低功耗管理，休眠模式时电流可低至 20 nA，看门狗定时器电流为 500 nA，实时时钟为 32 kHz 时的电流也只有 600 nA，与常用的 TI 公司的 MSP430 以及 Atmel 公司的 ATmega128 等相比具有明显优势^[3-4]。

通信部分的射频模块选用 Nordic 公司的低功耗、高速 2 Mbps 工业级嵌入式 2.4 GHz 无线收发芯片

nRF24L01，它具有增强型的 ShockBurst 功能，共 5 种工作模式：RX、TX、Standby I、Standby II、Power Down 模式，在 3 V 电压下各种模式的工作电流情况如表 1 所示。其中 PowerDown 模式的工作电流只有 900 nA，因此对于长时间工作在 Power Down 模式下的系统来说功耗是非常低的。并且该芯片具有两个无线通道，每个通道都可通过编程在上述 5 种工作模式中进行切换。

表 1 nRF24L01 5 种工作模式下的工作电流

Tab.1 nRF24L01's working currents in five different work modes

模式	工作电流/mA
@2 Mbps 速率 RX 模式	11.3
@0 dB 输出功率 TX 模式	12.3
Standby I 模式	0.022
Standby II 模式	0.320
Power Down 模式	0.9×10^{-3}

3 超低功耗通信协议设计

本协议采用最早期的无线计算机通信协议 Aloha 的设计思想，是最基础的星型拓扑网络。由末端传感器节点 Sensor 产生数据后主动将数据发送给 Sink 节点，并且 Sensor 节点定时采集数据，其余时间处于休眠状态。

3.1 工作原理

(1) nRF24L01 具有两个无线通道，可以同时工作，并且具有跳频功能，最多可支持 126 个不同频段。Sink 节点的通道 1 保持对固定工作频率 f_1 的监听状态，随时接收 Sensor 节点发送的数据。

(2) 一个 Sink 节点下连接多个 Sensor 节点，每个 Sensor 节点随机入网，入网后使用通道 1 以工作频率 f_1 主动向 Sink 节点发送数据包。数据包内包含跳频信息 f_2 ， f_2 是 nRF24L01 自动从 126 个频道内随机产生的。然后将通道 2 切换至 f_2 频段开始监听，监听时间 t_1 可设置，一般为数据发射时间的 3 倍。接收到 Sink 节点的应答报文后直接进入休眠模式；若没有接收到应答报文且超时定时器计时超时，则 Sensor 节点也切换至休眠模式。休眠时间 t_2 可以设置，时间到达后产生外部中断，节点自动唤醒，开始采集数据重复之前的操作。Sensor 节点的休眠自动唤醒工作流程如图 3 所示。

(3) Sink 节点的通道 1 一直处于对 f_1 频段的监听状态，接收到 Sensor 发送的数据后提取跳频信息 f_2 ，打开通道 2 切换至 f_2 频段，并使其工作在发送模式。

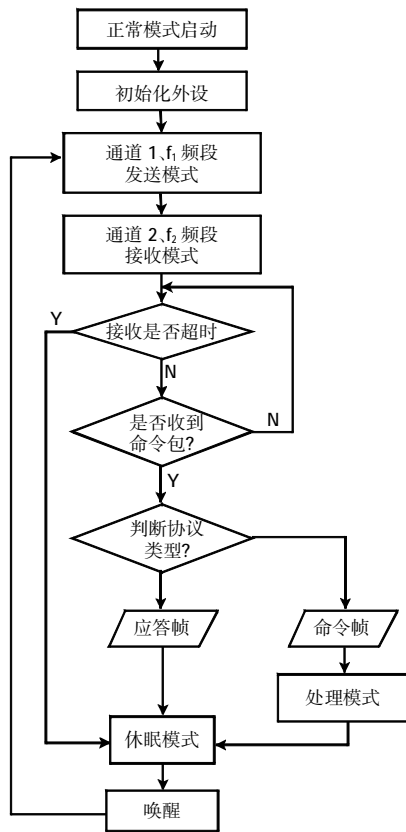


图 3 Sensor 节点工作流程图
Fig.3 Work flowchart of Sensor node

通道 1 继续保持对 f_1 频段的监听. Sink 标定 Sensor 节点的地址, 并判断是否有命令需要向 Sensor 节点发送, 如果有则发送命令帧; 如果没有则发送确认帧. 关闭通道 2, 使其工作在休眠模式. Sink 节点接收数据发送命令包的工作流程如图 4 所示.

3.2 防碰撞原理分析

协议采用的是类似最早期的无线计算机通信 Aloha 协议的星型拓扑结构, 由 Sensor 节点主动向 Sink 节点发送数据. Sensor 入网时间随机, 由其本身决定. 为了更好地降低 Sensor 的功耗, 这里没有使用 Aloha 的碰撞后重传来保证通信的可靠性. 而是通过给同一个 Sink 下的 Sensor 设定相同的发送数据的时间间隔, 这样只要节点入网时不发生数据碰撞, 那么整个网络的通信就是可靠的. 而节点的入网时间又是随机的, 所以数据发生碰撞的概率只与节点的工作周期、发送数据的时间和一个 Sink 下接入的 Sensor 的个数有关, 本文通过控制这些参数来降低数据碰撞的概率, 使其满足通信需求.

3.2.1 两个 Sensor 节点发生数据碰撞的概率

设 Sensor 节点的工作周期为 T , 节点的数据发送时间为 t_s , 休眠时间为 t_w , 两个节点分别为 S_1 和 S_2 ,

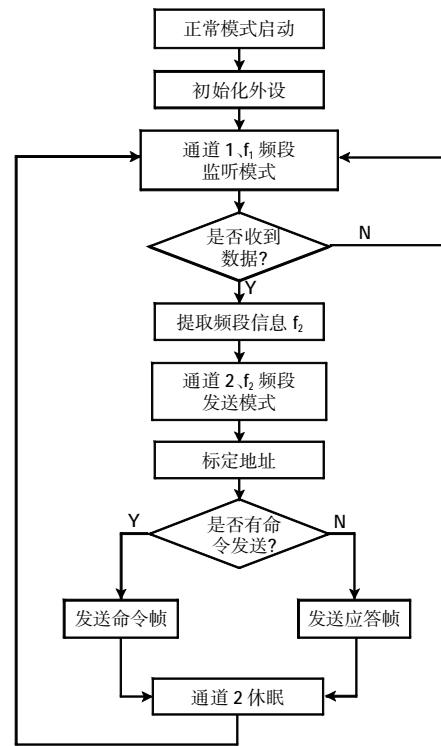


图 4 Sink 节点工作流程图
Fig4 Work flowchart of Sink node

它们的发送时间点处于不同位置时的工作状况如图 5 所示. 图 5 中, S_{21} 、 S_{22} 、 S_{23} 、 S_{24} 分别表示节点 S_2 4 个不同的发送时间的状态, T 为工作周期.

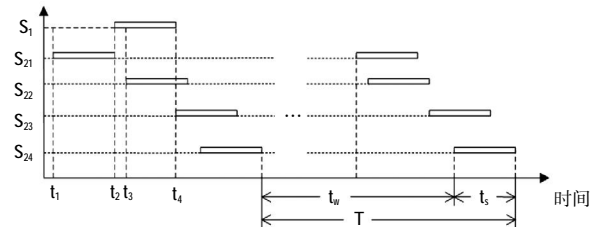


图 5 两个 Sensor 节点不同发送时间点处的工作状况
Fig.5 Working conditions of two Sensor nodes at different sending times

由图 5 可以看出, S_2 在 t_1 之前 t_4 之后发送数据将不会与 S_1 发生碰撞, 只有在 $t_1 \sim t_4$ 之间发送数据才会与 S_1 发生碰撞, 使得 Sink 接收到错误数据帧. 这个时间长度为节点发送数据时间的 2 倍, 即 $2t_s$.

在 Sensor 节点的一个工作周期时长内, 设 2 个节点发生数据碰撞的概率为 $P(2)$, 根据上述分析, S_2 在 $t_1 \sim t_4$ 时间内启动开始发生数据会与 S_1 发生碰撞, 可以得到 2 个节点随机启动发生数据碰撞的概率为:

$$P(2) = \frac{2t_s}{T} \tag{1}$$

3.2.2 n 个 Sensor 节点发生数据碰撞的概率

将上述分析推广到 n 个 Sensor 节点的情况, 设其

中有 i 个节点同时碰撞的概率为 P_i , 则有:

$$P_i = \left(\frac{2t_s}{T} \right)^{i-1} \quad (2)$$

设 n 个 Sensor 节点与 Sink 节点进行通信时发生数据碰撞的概率为 $P(n)$, 则有:

$$P(n) = C_{n-1}^1 P_2 + C_{n-1}^2 P_3 + C_{n-1}^3 P_4 + \dots + C_{n-1}^{n-1} P_n \quad (3)$$

将(2)式代入(3)式并化简可得:

$$P(n) = C_{n-1}^1 \frac{2t_s}{T} + \sum_{i=2}^n C_{n-1}^i \left(\frac{2t_s}{T} \right)^i \quad (4)$$

在实际系统中, 工作周期 T 一般为秒级, Sensor 节点数据发送时间 t_s 为毫秒级, $T \gg t_s$, $\frac{2t_s}{T}$ 的高次幂小于 10^{-5} , 可忽略不计. 故 n 个 Sensor 节点发生数据碰撞的概率可近似为:

$$P(n) = (n - 1) \times \frac{2t_s}{T} \quad (5)$$

所以可认为, 碰撞概率随 Sensor 节点个数的增加近似线性增大.

假设发生碰撞的概率 $P(n) \leq P_{\min}=1\%$, 在实际系统就认为不会发生碰撞, 所以可得到一个 Sink 节点下连接的 Sensor 节点的个数

$$n \leq \frac{P_{\min} T}{2t_s} + 1 \quad (6)$$

本协议设计的数据帧长度为 32 Byte, 发送速率为 2 Mbps, 故 $t_s = 128 \mu\text{s}$, 假设工作周期 $T=60 \text{ s}$, 经计算得 $n \leq 2344$. 即在 Sensor 节点数据发送时间为 $128 \mu\text{s}$ 、工作周期为 60 s 的情况下, 一个 Sink 节点下最多可连接 2344 个 Sensor 节点.

故在设计网络参数时, 只需控制 Sensor 节点的个数 (n)、工作周期 (T) 和每次数据发送的时间 (t_s), 确

保发生碰撞的概率 $P(n) \leq 1\%$ 即可保证通信可靠.

3.3 Sensor 节点功耗计算

无线传感器节点的能量消耗是无线传感器网络的常用指标之一. Sensor 节点的总功耗等于该节点单片机、传感器和无线射频模块的功耗之和. 本设计使用的 PIC16LF1828 单片机具有看门狗定时器, 工作电流为 500 nA, 将此模式作为单片机的休眠模式; 将 HFINTOSC 时钟源分频至 8 MHz 作为 MCU 唤醒后的系统时钟; 优化工作时序. 传感器使用 SHT11 数字温湿度传感器, 其数据采集时间为 80 ms. nRF24L01 无线射频模块采用先睡眠后唤醒的工作时序, 进一步降低功耗. Sensor 节点的工作时序如图 6 所示.

由图 6 可以看出, Sensor 节点的工作周期为 T , 其中 PIC16LF1828 单片机的工作模式有正常工作模式以及休眠模式, 工作电流分别为 I_w 和 I_s .

温湿度传感器 SHT11 的工作流程如下: 先经过 2 个时钟周期从休眠模式启动, 再经过 8 个时钟周期写入 1 个字节的命令, 接着等待 $t_m = 80 \text{ ms}$ 的测量数据时间, 然后经过 16 个时钟周期将数据读出. 单片机的工作频率 $f = 8 \text{ MHz}$, 故 1 个时钟周期的时间 $t_0 = 1/f = 125 \mu\text{s}$. 所以传感器的工作时间为:

$$T_1 = (2+8+16) t_0 + t_m = 26 t_0 + t_m \quad (7)$$

休眠时间为 $(T - T_1)$. SHT11 的测量电流 $I_m = 0.55 \text{ mA}$, 休眠电流 $I_s = 0.3 \mu\text{A}$, 故在 Sensor 节点的一个工作周期内温湿度传感器 SHT11 的功耗为:

$$W_1 = T_1 \times I_m + (T - T_1) \times I_s \quad (8)$$

无线射频模块 nRF24L01 在 Power Down 模式下进行初始化等一系列配置, 完成后单片机打开全局中断, 通过 SPI 口把数据帧装载入 nRF24L01 的 TX_FIFO

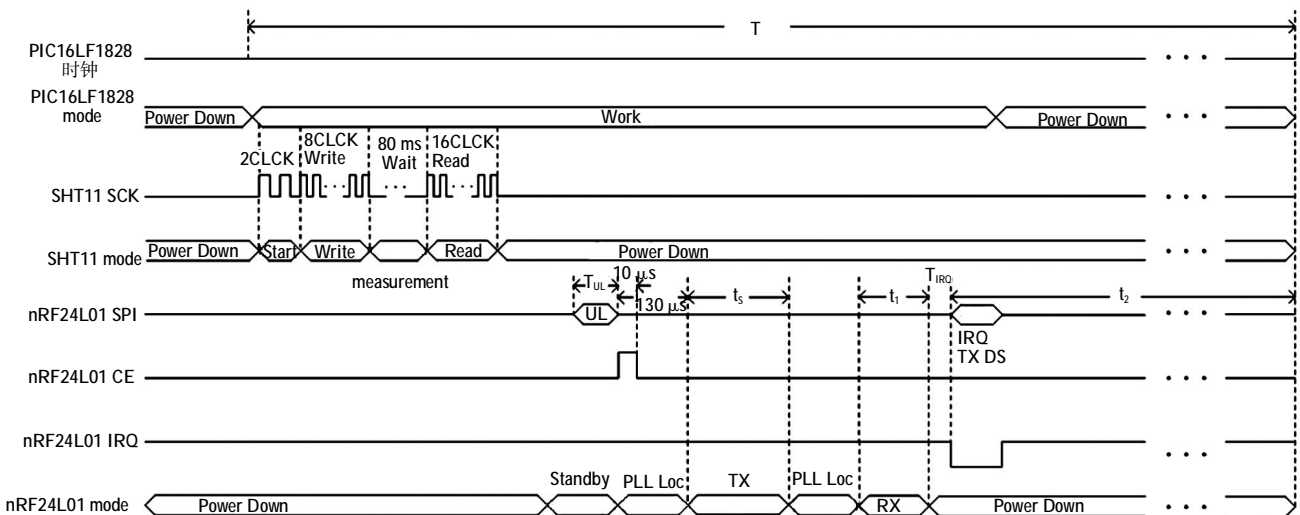


图 6 Sensor 节点工作时序图

Fig.6 Working time diagram of Sensor node

缓存中. 本协议的数据帧长度为 32 Byte, SPI 的速率由系统时钟决定为 2 Mbps, 装载数据的时延 $T_{UL} = \frac{32 \text{ Byte} \times 8 (\text{bit/Byte})}{2 \times 10^6 \text{ bps}} = 128 \mu\text{s}$; 且经过 $t_p = 130 \mu\text{s}$ (包

括单片机控制引脚 CE 大于 $10 \mu\text{s}$ 的置高时间) 的晶振稳定时间 (处于 Standby II 模式), nRF24L01 进入 TX 模式, 经过 t_s 的发送时间后, 再经过 $130 \mu\text{s}$ 的 Standby II 模式切换至 RX 模式, 在监听 t_l 时间后切换至休眠模式. 休眠时间为:

$$t_2 = T - T_{UL} - 2t_p - t_s - t_l \quad (9)$$

设 nRF24L01 在 TX 模式时的工作电流为 I_T , RX 模式时的工作电流为 I_R , Standby I 和 Standby II 模式的工作电流分别为 I_1 、 I_2 , Power Down 模式时的工作电流为 I_p . 故在 Sensor 节点的一个工作周期内无线射频模块 nRF24L01 的功耗为:

$$W_2 = I_T \times t_s + I_R \times t_l + I_1 \times T_{UL} + I_2 \times 2t_p + I_p \times t_2 \quad (10)$$

由上述工作时序可以看出, 单片机的工作时间为传感器 SHT11 和无线射频模块 nRF24L01 的工作时间之后, 即:

$$t = T_1 + (T - t_2) = 26t_0 + t_m + T_{UL} + 2t_p + t_s + t_l \quad (11)$$

所以在 Sensor 节点的一个工作周期内 PIC16LF1828 单片机的功耗为:

$$W_3 = I_w \times t + I_s \times (T - t) \quad (12)$$

故 Sensor 节点在一个工作周期 T 内总功耗为:

$$W = W_1 + W_2 + W_3 \quad (13)$$

若选取容量为 500 mAh 的锂电池为 Sensor 节点供电, 则节点的工作寿命可计算为 $\frac{500 \text{ mAh}}{W} \times T$. 假设设置

节点在 f_2 频段上的监听时间 t_l 为 1 ms, 节点的工作周期 $T = 60 \text{ s}$, 则节点的理论寿命为 13 a 左右.

3.4 协议的功耗对比

Zigbee 协议是目前使用比较广泛的一种无线传感器网络通信协议, 然而由于 Zigbee 协议栈的标准性, 在对基于 Zigbee 的无线传感器网络进行低功耗设计时只能从硬件上设计实现. 但是其路由发现、路由维护、组建网络等一系列复杂功能使节点在低功耗上很难有大的突破. 一些在硬件上做了低功耗设计的 Zigbee 节点在使用两节 5 号干电池的情况下, 节点寿命也只有 1~2 a 时间^[9].

LEACH 协议是一种低功耗自适应分簇算法, 以“轮”作为工作周期, 通过每轮建立新簇、选择新簇头来平衡整个网络的功耗. 虽然簇头的选择是根据相等概率的随机机制选取的, 但还是会存在簇头节点能量耗尽的情形而影响网络寿命. 在对 LEACH 协议进行

改进的研究中, 让剩余能量高的节点更有机会当选为簇头来延长整个网络的寿命^[9]. 然而这样的改进最多使网络寿命延长 1~2 倍, 建立簇本身也在消耗着能量, 因此难以达到更理想的效果.

尽管网状网拓扑结构的鲁棒性比较强, 但是由于需要清楚地了解各个传感器节点的位置信息, 同时路由开销比较大, 使得节点构造和网络实现比较复杂, 节点和整个网络的能耗也因此增加. 所以在传输距离较近、环境干扰大的工业现场协议复杂的网状网并不是非常的适用, 可以选择使用星型拓扑网络.

本文所设计的超低功耗协议, 在选取容量为 500 mAh 的锂电池为 Sensor 节点供电, 节点理论寿命可达到 13 年左右, 且网络中不用为建立与维护路由而产生额外的能量开销. 由此可见, 本文所设计的星型无线传感器网络协议在超低功耗上与现有的 Zigbee、LEACH 协议相比具有明显的优势.

4 仿真分析

本文使用 OMNeT++ 网络仿真软件对所设计的协议进行仿真分析. OMNeT++ 是一款开源的基于组件的模块化开放网络仿真平台, 其作为离散事件仿真器, 具备强大完善的图形界面接口和可嵌入式仿真内核. 同 NS2、OPNET 和 JavaSim 等仿真平台相比, OMNeT++ 可运行于多个操作系统平台, 可以简便定义网络拓扑结构, 具备编程、调试和跟踪支持等功能^[7-8]. 其中 Sensor 节点的仿真模型如图 7 所示.

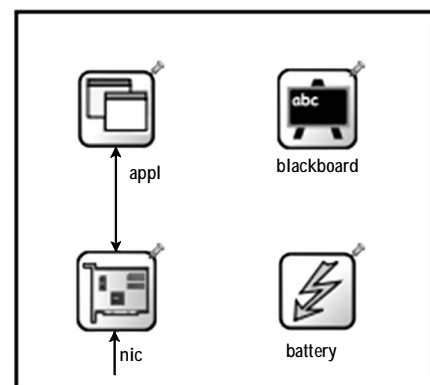


图 7 Sensor 节点模型

Fig.7 Model of Sensor node

模型由 appl 模块 (用于实现数据采集), nic 模块 (实现与 Sink 节点的无线通信)、battery 模块 (用于节点的能量监控) 以及黑板模块 (blackboard) 组成. 节点模型的具体参数如表 2 所示.

表2 Sensor节点主要参数

Tab.2 Main parameters of Sensor node

参数	数值
数据传输速率/Mbps	2
数据帧长度/Byte	32
节点工作周期/s	60
电池容量/mAh	500
数据传输时延/ms	1

设置节点个数为 300 进行仿真, 电池容量与仿真时间的关系如图 8 所示。

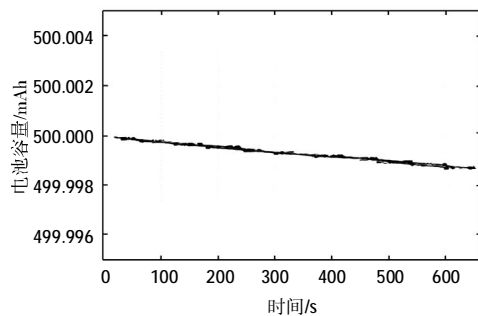


图8 Sensor节点剩余电池容量

Fig.8 Sensor nodes' battery capacity remaining

由图 8 可知, 本系统中 Sensor 节点的电池容量线性下降, 下降速度与节点的工作周期相关. 所以工作周期确定后, 多个节点的电池容量情况在图中基本重合. 在 600 s 仿真时间内节点能量的消耗微乎其微。

图 9 所示为不同 Sensor 节点数量以及工作周期下发生碰撞概率的情况。

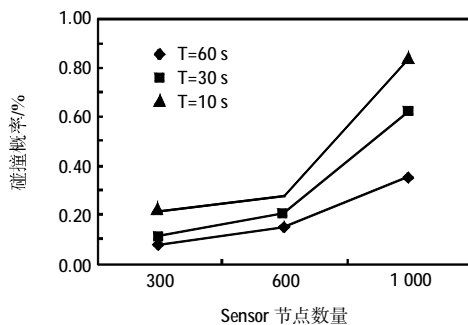


图9 Sensor节点数量、工作周期与碰撞概率关系图

Fig.9 Correlation between number of nodes, working cycle and probability of collision

由图 9 可以看出, 在工作周期相同的情况下, 节

点数量的增加会导致碰撞概率的增大; 在相同节点数量下, 缩短节点的工作周期也会增大碰撞的概率. 从整体来看碰撞发生的概率均小于 1%。

5 结束语

本文针对已有无线传感器网络整体功耗较高且网络寿命不长的现状, 提出了一种具有双通道的无线传感器网络超低功耗通信协议, 给出了传感器节点的硬件方案以及和基站节点的工作流程图, 并分析了网络防碰撞原理、网络参数设计原则, 对本文中所设计的传感器节点功耗和寿命进行了计算. 与现有的无线传感器网络通信协议 Zigbee 协议、Leach 协议等相比, 本文所提出的通信协议具有明显优势. 最后使用 OMNeT++ 网络仿真软件对协议进行了仿真验证, 保证了协议的可靠性, 可将该协议运用于对低功耗要求严格, 更换电池和设备困难较大的环境中。

参考文献:

- [1] 万时光, 马小铁, 李凯. 星型无线传感器网络的应用研究[J]. 通信技术, 2009, 42(3): 173-176.
- [2] 高原, 文瑞松, 王土央. 无线传感器网络环境监测采集节点的设计[J]. 实验技术与管理, 2012, 29: 127-131.
- [3] 曾勇, 杨涛, 冯月晖. 基于 nRF24L01 的超低功耗无线传感器网络节点设计[J]. 嵌入式技术, 2008 (7): 45-48.
- [4] PHILIPPE Le-Huy, SÉBASTIEN Roy. Low-power wake-up radio for wireless sensor networks [J]. Mobile Networks and Applications, 2010, 15(2): 226-236.
- [5] 吕宏, 黄钉劲. 基于 Zigbee 技术低功耗无线温度数据采集及传输[J]. 研究与开发, 2012, 31(2): 58-60.
- [6] 周冲, 余震虹, 卜凡云, 等. WSN 中低功耗路由协议 LEACH 的一种改进方法[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(21): 5070-5074.
- [7] 段世红, 王沁, 于彦伟. 基于低能耗 WSN 的石油站监控系统设计[J]. 计算机工程, 2011, 37: 17-19.
- [8] 杨光旭, 刘方爱, 赵学成. OMNeT++ 平台上无线传感器网络仿真系统的研究[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(9): 3443-3446.