

# 基于 FPGA 控制的智能小车的设计

李毓川

(清华大学 自动化系, 北京 100084)

**摘要:** 为了设计能实现具有避障、循迹、遥控和测速功能的智能小车, 利用 Cyclone 2 类型的 FPGA 作为控制核心, 采用模块化的设计思路, 使用红外对管、超声波传感器、蓝牙模块和霍尔元件实现小车的相关运动功能; 分别设计了智能小车的硬件电路和软件程序; 在软件编程中结合实际车辆运行情况, 创新性的提出了一种智能小车的循迹方式, 巧妙处理了转弯半径过小的循迹问题, 并在实际现场调试测定了相关的控制参数, 如小车转弯时的“倒车时间 T”; 经过现场的系统测试, 设计的智能小车运行平稳, 性能优良。

**关键词:** FPGA; 智能小车; 控制系统; 循迹; 避障

## Design of Intelligent Car Based on FPGA

Li Yuchuan

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to design an intelligent car with obstacle avoidance, tracking, remote control and speed measurement functions, a Cyclone 2 chip is used as the control core of FPGA. The modular design concept is used to design the hardware circuit and software program of the intelligent car. Infrared tube, ultrasonic sensors, Bluetooth modules and Hall elements are used to achieve the functions of the car. In order to handle the tracking problem of small turning radius of software programming, a tracking method of intelligent car is innovatively put forward, which combines the actual operation of vehicles. Relevant control parameters are also measured in the actual field debugging, such as car Turnover Time T when turning. After the on-site system test, the designed smart car is running smoothly and with excellent performance.

**Keywords:** FPGA; intelligent car; control system; tracking; avoidance

## 0 引言

智能小车是轮式移动机器人研究领域的一项重要内容, 也是陆地自主行驶车辆 (autonomous ground vehicle, AGV) 的一种, 在社会生活的各个领域, 有广泛的应用前景<sup>[1-4]</sup>。智能小车一般由行走部件和控制部件组成。控制部件是智能小车的核心, 根据小车要实现的不同运动功能, 控制部件可以采用相应的各种控制芯片。

小车的控制芯片的类型多种多样, 单片机是其中应用最为广泛的一种。而 FPGA 作为控制芯片中的重要一类, 也被广泛使用。尤其在遇到需要控制多种输入输出元件时, 由于单片机本身并不能与外设直接相接, 所以, 每当增加外设时, 单片机的驱动电路就需要进行很大的改动。而由于 FPGA 提供许多的管脚和接口, 就使得 FPGA 外接外设相对更加方便。同时, FPGA 使用硬件描述语言进行编程, 硬件描述语言在信号的逻辑处理和输入输出上更加通俗易懂。总之, FPGA 凭借相较单片机更好的定制性, 更快的烧录速度和更简洁的编程从而被广泛的认可和应用。

本文设计了一台基于 FPGA 控制的智能小车, FPGA 使用 Cyclone 2 类型的主控芯片, 这种芯片功能强大, 功耗较

低。FPGA 板上有多种输入和输出元件, 如拨码开关、按键开关、LED 灯和数码管等。同时, FPGA 板上还留有許多管脚, 方便外接传感器与电路。FPGA 板经过编程调试后与外设配合合作可以实现多种控制功能<sup>[5]</sup>。

本文以能实现避障、循迹、遥控和测速的智能小车作为研究对象, 分硬件部分和软件部分对小车进行设计。在硬件部分中, 利用模块化的原则, 设计了简洁、高效并且可靠性强的电源管理电路、电机驱动电路和传感器信号处理电路。在软件部分, 本文创新性的在循迹功能中引入现实车辆的转弯处理办法, 简化了智能小车转弯的流程, 提高了效率和可靠性。并且在避障功能中对多个距离数据进行加权后再处理, 提高了数据利用率和避障效率。经过调整测试后, 小车获得了较好的运动功能。

## 1 硬件部分设计

本文设计的能实现避障、循迹、遥控和测速功能的智能小车的硬件结构如图 1 所示。从图 1 中可以看出, FPGA 板是整个硬件部分的核心, 它能接收各个传感器传输的信号, 并且将信号经过 FPGA 内部调试好的程序处理之后, 发送到电机与舵机及其相应的驱动电路, 最终实现对小车的行进方向和速度的控制。

由于 FPGA 易于连接外设, 所以小车的整体设计采用模块化结构。以下对图 1 中所示的相关硬件部分的设计过程和工作原理进行说明。

收稿日期: 2018-03-02; 修回日期: 2018-04-09。

作者简介: 李毓川(1996-), 男, 北京人, 主要从事运动控制算法、图像识别优化算法的研究。

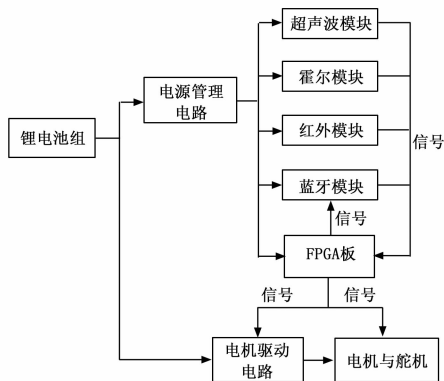


图 1 智能小车硬件结构图

### 1.1 电源管理电路与电机驱动电路

无论智能小车中的电机和各个传感器模块都需要相应的供电电源，而所设计智能小车的电池组参数为额定电压 7.2 V、容量为 2000 mAh，因此，需要设计相应的电源管理电路。

对于传感器，由于升压电路在 7.2 V 这样的低电压条件下的可靠性不如降压电路的好，所以选择传感器的额定电压应小于 7.2 V，本设计的四种传感器的额定电压选择为两种：5 V 和 3.3 V。所以，一共需要两种电源管理电路，如图 2 和图 3 所示。

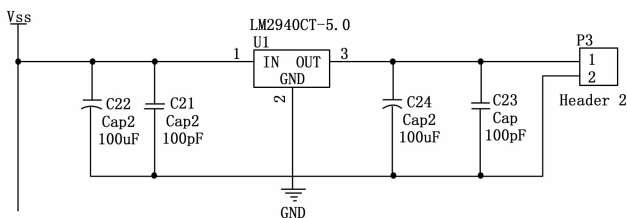


图 2 7.2 V 转 5 V 电源管理电路

图 2 所示为 7.2 V 转 5 V 的电源管理电路，电路左端输入 7.2 V 直流电压，右端输出 5 V 电压，整个电路中只有一个稳压器芯片，这样使得整体电路简单同时可靠性较高。这个电压转换电路为超声波模块、霍尔模块和蓝牙模块供电。

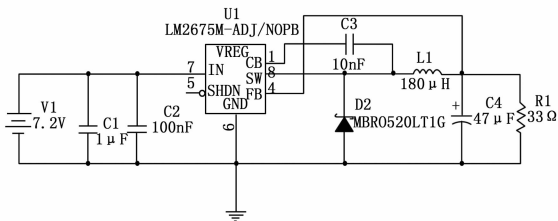


图 3 7.2 V 转 3.3 V 电源管理电路

图 3 所示为 7.2 V 转 3.3 V 的电源管理电路，同样地，电路左端输入 7.2 V 直流电压，右端输出 3.3 V 电压，相对于 5 V 的电压转换电路而言，这个电路中也只有一个稳压器芯片，但是其他元件的数量相对较多，使得整体电路比 5 V 电压转换电路更加复杂。这个电压转换电路为红外模块供电。

在本设计中选择的驱动电机的驱动电压在 5.4 V 至 9.0 V 之间，虽然，电池电压在这个范围内，但是，由于电机工作时需要 11.6 A 左右的大电流，这样的功率无法由 FPGA 板直接提供，所以需要设计特定的电机驱动电路，如图 4 所示。

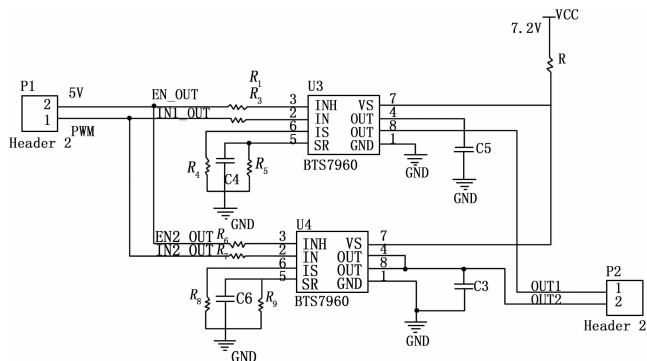


图 4 电机驱动电路

在图 4 中，电路左端输入 5 V 直流电压和 FPGA 输出的 PWM 波，电路右端输出调制好的 PWM 波。电路中使用两个 BTS7960 稳压芯片，他们分别在电动机正转和反转时候工作。这个电路相较于之前的电源管理电路，由于输出电流较大，需要很高的可靠性，所以电路形式最为复杂[6]。

此外，舵机的驱动由于不需要很大的输入功率，所以可以使用 FPGA 的引脚输出直接驱动。

### 1.2 电路模块硬件设计

由于传感器模块采集到的数据需要传递给 FPGA 板进行处理，而红外、霍尔元件等传感器直接传递的数据为模拟信号，需要进行相应的处理后传递给 FPGA 板进行进一步的分析[7]。下面将介绍每个传感器相对应的处理电路。

霍尔元件的信号处理电路如图 5 所示，电路中使用的芯片为 LM393，是一个运放芯片。图中的 P3 代指霍尔元件的三个接口。霍尔元件的输出通过一个上拉电阻之后进入运算放大器构成的比较器，与设定好的比较电压进行比较，然后向 FPGA 输出设定好的电压，经过 FPGA 的判断后，即成为一个轮子转动一周的信号，从而实现最终的车速的测量[8]。

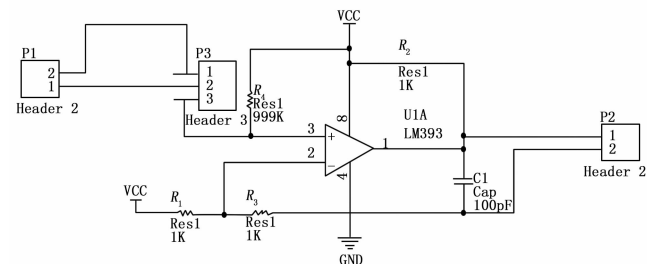


图 5 霍尔元件信号处理电路

红外对管的信号处理电路如图 6 所示，电路中使用的芯片为 74HC04，是一个运放芯片，它起反相器的作用。图 6 中 DS1 是电源指示灯、DS2 是信号输出指示灯。当红外接收管 U3 接收到反射回来的红外信号时，U3 管的 3 与 4 导通，

即 4 处于低电平，经过 74HC04 反相之后输出高电平，使指示灯 DS2 亮。如果红外接收管 U3 没有接收到反射回来的红外信号，则 U3 管的 4 处于高电平，反向后为低电平，指示灯 DS2 不亮。最后 P1 将输出的高/低电平输出给 FPGA 板进行下一步的处理，这样就可以实现红外循迹的功能<sup>[9]</sup>。

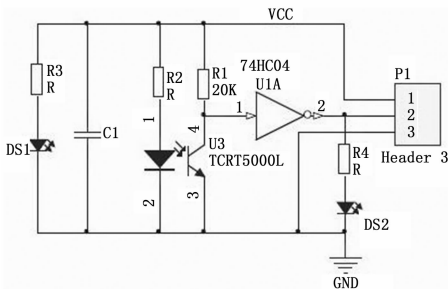


图 6 红外对管信号处理电路

对于蓝牙模块和超声波传感器模块，为了保证电路的高可靠性，在本设计的智能小车中，蓝牙模块选用了成熟的 HC-05 模块，超声波模块选用了成熟的 HCSR04 模块。

## 2 软件部分设计

软件程序的编写就相当于给这个小车注入“灵魂”。在 FPGA 中，自动控制的实现依靠状态机。所以本小车的行驶状态的切换由状态机完成，利用设定好的状态和状态跳转条件，就可以使得智能小车依据传感器采集到的数据自动判断和切换行驶状态。

智能小车在运动过程中，当环境条件变化时，需要具备快速的反应能力，而这种快速的反应能力可以通过软件的逻辑判断来快速实现。FPGA 的硬件描述语言善于表达逻辑关系和描述输入输出信号，因此，采用 FPGA 智能芯片的智能小车的控制系统就能表达成相关的逻辑判断，从而确保了智能小车具有很好快速的反应能力。

小车上安装的超声波传感器和红外传感器如图 7 所示。当前能够实现循迹、避障和遥控功能的小车有许多种，它们的硬件结构大致相似，所以软件程序就成为了决定智能小车性能的关键要素。

以下主要讲述实现循迹和避障功能的软件程序设计。

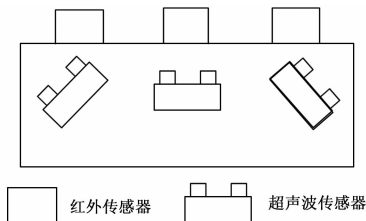


图 7 小车车头上的超声波传感器与红外传感器位置图

循迹功能的实现：在图 7 中可以看出，三个红外传感器被水平的安装在车头的中部，而地面上的黑线是小车循迹的路线。在文献 [10] 中，作者分别选了一个和两个红外传感器来实现小车在一条直线和两条平行直线上循迹的功能，由于循迹的路线可能是一条黑线作为小车中心

部分的指示线，也有可能两条代表路边线指示线的平行黑线。这时，如果小车仅仅使用一个或者两个红外传感器就不能保证在两种轨迹上都能循迹<sup>[11]</sup>。小车在上述两种不同道路上的循迹功能的适应性也就得不到保证。

因此，本文设计的小车采用三组红外传感器，如果是在一条轨迹的循迹路线上，可以使用中间的一个红外传感器判定黑线的位置，两边的红外传感器判定偏离黑线的距离；而对于两条平行的循迹轨迹，则可以使用两边的红外传感器分别判定小车是否越道路“边界线”。这样就是使得本文设计的智能小车在循迹中具有更强的适应性。

除此之外，在循迹中还会遇到另一个问题：就是有时候循迹轨迹的转弯半径很小，甚至小于小车的转弯半径。在文献 [12] 中，作者给出的解决方案是：设计可以伸缩调整的小车底盘，从而适应不同的转弯半径。但是这会导致小车机械结构的复杂性增加，同时可靠性降低。本文设计的智能小车，参考了实际车辆在遇到较小转弯半径时候的解决办法：即利用倒车的办法。

在转弯半径小于小车的转弯半径的拐弯处，三个红外传感器对于地面上是否在“线”上的判定会组成 8 种情况，将这 8 种情况进行分类之后可以得知：如果小车的左侧或者右侧两个红外传感器判定小车已经偏离了黑线的位置，那么此时小车在转弯处偏离黑线的距离就比较大，也就是说，黑线的转弯半径可能比较小，这个时候，就需要利用“倒车”进行挪车。

倒车的程序实现一般有两种方式进行“倒车结束”的判定：固定倒车时间和利用红外传感器实时判定倒车位置。从理论上讲，利用传感器判定倒车位置会使得智能小车行进的更加精准，但是在实际运行中，由于转弯半径很小，触发信号的间隔也很小，而小车切换前进与倒车需要一定的加速与减速时间，当触发信号间隔小于加速时间时，就会导致小车处于加速与减速的死循环中。所以，为了避免上述情况的发生，本文设计的智能小车选择固定的倒车时间来实现在小的转弯半径中转弯。

实际的倒车时间  $t$  需要在现场中进行测试来获得。将测试环境设定为：半径为 5 厘米的 90 度角的转弯，小车从同一位置出发，记录在不同倒车时间情况下小车通过该弯道的总时间  $t$ 。绘制出如图 8 所示的曲线。

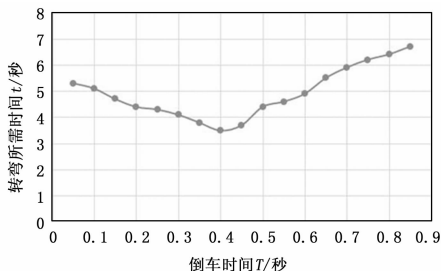


图 8 倒车时间对转弯所需时间影响曲线

从图 8 中可以看出，当倒车时间  $T=0.4$  秒时，智能小车转弯时间最短，所以，最终设定该小车的倒车时间为

0.4 秒。

避障功能的实现：从图 7 中可以看出，小车的前部放置有 3 个超声波传感器，中间的传感器方向正对小车前方，左右的传感器分别向左前方和右前方，与正前方的夹角为 45 度<sup>[13]</sup>。小车在行进过程中，一共会收到超声波传感器传递的三个距离数据，取这三个距离数据的最小值为  $L$ ，将其与一个设定好的临界距离值  $L_{\min}$  比较，当  $L < L_{\min}$  时，状态机跳变，小车变换前进方向，从而可以避开障碍物。当  $L > L_{\min}$  时，状态机不跳变，小车保持原有的行进方向。

霍尔测速的实现：霍尔元件处理电路的输出端向 FPGA 输出一个电压信号，这个电压信号经过 FPGA 的判断后，成为轮子转动一周的信号，接着判断单位时间内轮子转动的圈数，也就可以算出小车单位时间行进的距离。从而完成了车速的测量。

蓝牙遥控的实现：每一次蓝牙通信中，都会传递 16 位的字符数据<sup>[14]</sup>，可以将小车的控制信号写在这 16 位字符数据中。只要设定好每种字符数据对应的小车运动状态，就可以利用电脑或者手机端的蓝牙发送装置向小车发送字符数据<sup>[15]</sup>，控制小车的行进。

经过软件程序编写与控制参数的实际测试之后，智能小车也完成了从小车向“智能”小车的蜕变。再经过实际测试之后，智能小车就可以投入使用了。

### 3 实验结果与分析

完成整车拼装，并写入控制程序后，实际的小车如图 9 所示。从图 9 可看出，小车分为三层，最上层是用于控制的 FPGA 板，其上的导线与许多传感器连接。中间层是电源转换电路和电机驱动电路，最下层是各种传感器、电池以及小车的机械部件。

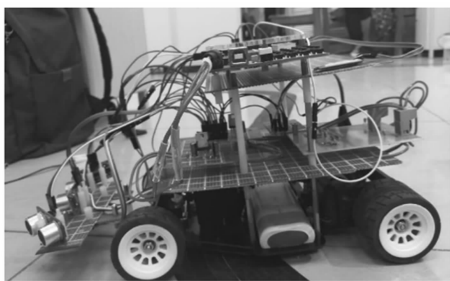


图 9 整车图

实际测试的轨道如图 10 所示，整个测试分为 3 个步骤进行，第一个步骤为蓝牙遥控测试，在测试中，使用安卓智能手机中的蓝牙客户端与小车进行通信，控制小车的行进和方向，由于手机使用蓝牙 4.0 技术，所以蓝牙遥控的延迟时间少于 0.1 s，同时小车上的 FPGA 板上的数码管也能显示出小车的运行速度。第二个步骤为循迹测试，在测试中，小车在粗轨道与细轨道上的循迹运行良好，并且在进行转弯时，倒车时间控制在 0.4 s，小车总的转弯时间约为 3.4 s，在转弯中兼顾稳定性与速度。第三个步骤为避障测试，在测试中，使用纸箱作为障碍物，在识别纸箱代表的障碍物时，小车能精准识别障碍物距离并且成功避障

运行。

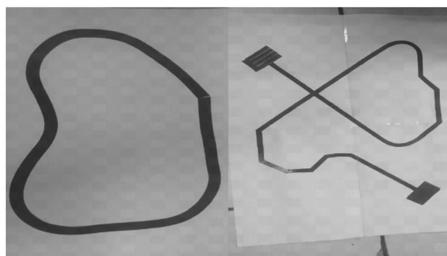


图 10 实际测试轨道

由于蓝牙信号的传递和处理需要一定的时间，所以小车的遥控存在一定的滞后现象是必然的，能尽量减少的时间是电路和芯片处理信号的时间，当前的结果已经符合了一般的遥控需求。而由于小车车速是由霍尔元件识别的小车车轮转速计算而来，所以最终精确到小数点后一位，单位为厘米  $\times$  秒<sup>-1</sup>。循迹测试中，由于小车使用了本文创新的“在转弯中倒车”方法，所以小车的转弯速度和稳定性都比较高。在避障测试中，设定好了足够的最小障碍距离，小车就可以比较好的避开障碍物，实现避障运行。

在测试中，FPGA 优异的烧录速度和优秀的外接外设能力给调试提供了很大的便利。

从测试中可以看出，本文设计的智能小车能很好的完成设计的功能，并且整体框架简洁，可靠性强。

### 4 结论

本文设计并实地调试了能实现避障、循迹、遥控和测速的智能小车，分硬件部分和软件部分对小车进行设计。在硬件部分，利用 FPGA 的易于连接外设的特点，采用模块化的结构，设计了简洁、高效并且可靠性高的电源管理电路、电机驱动电路和传感器信号处理电路。在软件部分，由于 FPGA 的硬件描述语言易于表达逻辑和信号输入输出的特点，创新性的在循迹功能中引入现实车辆的转弯处理办法，简化了智能小车转弯的流程，提高了效率和可靠性，并且实地调试了转弯参数，如“倒车时间”。在避障功能中对多个距离数据进行加权后再处理，提高了数据利用率和避障效率。通过实际场地的调试，小车实现了较好的运动功能。

#### 参考文献：

- [1] 赵学浩, 钱卫国. 基于单片机的无线智能小车设计 [J]. 常熟理工学院学报 (自然科学) 2016, 30 (4): 93-96.
- [2] 马丹萍, 李 勇, 梁勤欧. 无线遥控智能小车的运动模拟及轨迹绘制 [J]. 浙江师范大学学报 (自然科学版), 2015, 38 (1): 116-120.
- [3] 董 涛, 刘进英, 蒋 苏. 基于单片机的智能小车的设计与制作 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (2): 380-382.
- [4] 贺军义, 蒋 坚, 李男男. 基于 FPGA 的 DDS 信号发生器设计 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (2): 231-233.
- [5] 芮晴波. 基于 FPGA 的智能小车系统 [D]. 南京: 江苏大学, 2007.

[6] 曾 英, 赵河明, 彭志凌. 基于 MSP430 多功能智能小车的设计 [J]. 电子测量技术, 2017 (6): 10-14.

[7] 李新科, 高 潮, 郭永彩, 等. 基于语音识别和红外光电传感器的自循迹智能小车设计 [J]. 传感器与微系统, 2011, 30 (12): 105-108.

[8] 李潇雯. 智能小车设计中传感器的应用 [J]. 太原大学教育学院学报, 2015, 33 (2): 96-99.

[9] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术 [M]. 第 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2005.

[10] 顾 群, 蒲双雷. 基于单片机的智能小车避障循迹系统设计 [J]. 数字技术与应用, 2012 (5): 23-23.

[11] 刘 卓, 朱圈俊, 林游祥, 等. 智能小车的循迹控制与实验 [J]. 电脑编程技巧与维护, 2012 (22): 90-92.

[12] 秦 刚, 杜 超, 吴丹怡. 智能车转弯控制算法的仿真及分析 [J]. 自动化技术与应用, 2012, 31 (12): 49-54.

[13] 李 磊, 曹生炜. 智能小车避障技术的实现 [J]. 微电机, 2011, 44 (6): 109-111.

[14] 聂 茹. 基于 Android 手机蓝牙控制的智能小车设计与实现 [J]. 微型电脑应用, 2015, 31 (9): 68-69.

[15] 郑海城, 杨冬涛, 刘 燕, 等. 基于蓝牙控制的智能小车设计 [J]. 电脑与电信, 2016 (5): 62-64.

(上接第 40 页)



图 5 本文方法的误比特率



图 7 文献 [10] 方法的误比特率

了网络数据包接收和拒绝的方式, 并将采集到的数据包拷贝传送到系统的监听设备, 减少了系统信息中存在的错误比特数, 降低了系统的误比特率。分析图 6 可知, 文献 [9] 方法的误比特率为 19.29%, 该方法采用虚拟仪器技术对网络信号进行监测和识别, 通过数字滤波和触发限制对网络信号进行处理, 在处理的过程中存在大量的计算, 易出现误差, 使系统中的错误比特数增加, 系统的误比特率升高。分析图 7 可知, 文献 [10] 方法的误比特率为 41.44%, 该方法对网络中的所有节点进行监测, 采用优化协调机制对网络节点进行优化, 每条通信链路上都有多个网络节点进行覆盖和监测, 该方法对网络数据进行监测时, 所用算法较为繁琐, 用时较长, 当大量的网络信息对系统进行访问时, 该方法由于计算所用时间较长无法对大量的网络信息进行监测, 使系统信息中的错误比特数较多, 误比特率高。

刷新的响应时间少、误比特率低的要求, 提供了一个全新的路由协议攻击监测系统, 为网络安全提供了保障。

参考文献:

[1] 华吉宏, 张 璐, 范 毅, 等. 城轨无线传感网中链状分簇路由协议的研究 [J]. 电子设计工程, 2016, 24 (6): 22-25.

[2] 刘 韬. 异步传感网中能量感知的跨层路由协议 [J]. 计算机仿真, 2015, 32 (9): 290-294.

[3] 杨小琴. 物联网中的一种改进的 Leach 的数据融合路由协议的设计 [J]. 科技通报, 2016, 32 (12): 138-141.

[4] 李 林, 王鹏军, 汪 玉, 等. 基于 CAN 总线的桥梁健康监测系统异构网络协议研究 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15 (4): 145-149.

[5] 张贝贝, 王婷婷. 基于 TinyOS 的无线传感器网络 AODV 路由协议的实现与优化 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (5): 1743-1746.

[6] 林 晖, 田有亮, 许 力, 等. HWMN 中一种新的隐私感知安全路由协议 [J]. 计算机研究与发展, 2015, 52 (8): 1883-1892.

[7] 潘 洁, 廖振峰, 张 衡, 等. 基于高光谱数据与网络 GIS 应用的森林病虫害监测系统研究 [J]. 世界林业研究, 2015, 28 (3): 47-52.

[8] 王 骥, 林杰华, 谢仕义. 基于无线传感网络的环境监测系统 [J]. 传感技术学报, 2015, 24 (11): 1732-1740.

[9] 朱 利, 刘尚合, 张 悦, 等. 基于虚拟仪器技术和神经网络的电晕辐射场监测系统的设计 [J]. 高电压技术, 2015, 41 (1): 333-338.

[10] 杨宏宇, 王信元. 基于链路覆盖的无线 Mesh 网络入侵检测方法 [J]. 北京邮电大学.



图 6 文献 [9] 方法的误比特率

4 结论

从实验和实际运行结果看出, 本文所提的低敏感路由协议攻击自适应监测系统已经达到了带宽占有率低、页面