

## 基于 WSN 的高铁线路防入侵系统研究\*

赵凌

(铁道警察学院轨道交通安全保卫系 郑州 450053)

**摘要:** 针对不法分子利用金属设备破坏防护网或刺丝滚笼进入高铁线路实施盗窃或破坏的违法犯罪行为,提出了基于无线传感器网络的高铁线路防入侵系统。该系统结合无线传感器网络低功耗、自组网的技术特点,搭建了高铁线路防入侵系统架构,提出了数据采集节点的设计方案和节点部署方案。其中,数据采集节点集成了被动红外、超声波和磁场传感器,三传感器报警数据以“相与”的形式输出作为系统报警信息;重点研究了中继节点的部署方案,并对方案进行了仿真和实例分析,结果表明当中继节点间距不大于 140 m 时,其数量误差被控制在 10% 以内。该系统能够有效监控高铁线路的入侵行为,并为行车安全提供保障。

**关键词:** 高铁线路;无线传感器网络;防入侵系统;节点部署

**中图分类号:** TN91      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.1040

Study of high-speed rail line anti-intrusion system  
based on wireless sensor networks

Zhao Ling

(Rail Transit Security Department, Railway Police College, Zhengzhou 450053, China)

**Abstract:** According to the behaviors of illegal action that the people who enter into high-speed rail line by using metallic equipment to damage the protecting mesh or barbed wire cage, the paper puts forward a high-speed rail line anti-intrusion system based on wireless sensor networks. Combined with the technical features of low power and self-organized network of WSN, the paper constructs the system architecture, the design of data acquisition node. And the scheme of nodes placement are proposed as well. Among them, the data acquisition node is integrated with the passive infrared sensor, ultrasonic sensor and magnetic field sensor. The system alarm information is derived from three sensors' alarm data by "and operation". The scheme of relaying nodes placement is mainly studied and a simulation case analysis is used whose outcome of node number error is limited to 10% while the distance between relaying nodes is not more than 140 m. The system can be able to effectively monitor the intrusion behavior into high-speed rail line and ensure train operation safety.

**Keywords:** high-speed rail line; wireless sensor networks; anti-intrusion system; nodes placement

## 0 引言

高铁线路人为因素造成的安全隐患突出表现为:不法分子利用金属设备破坏或翻越高铁线路外围封闭设施,进入高铁线路实施盗窃、破坏。当前,高铁线路的安全防范主要以物防和人防为主<sup>[1-2]</sup>;物防是以钢筋混凝土或防护网为屏障,顶部加装单层或双层刺丝滚笼,防范人为攀爬或翻越;人防是以线路民警或辅警全天候沿高铁线路巡逻防控为主要手段,及时发现并处置高铁线路出现的安全隐患。

但刺丝滚笼在长期的野外恶劣环境下生锈、脱落时有发生,防范能力势必下降。另外人力巡控难免存在时间盲区,会给不法分子可乘之机。视频监控是常用的技术防范措施,可以有效防范非法入侵行为,并为后期执法取证提供依据,但在数万公里的高铁线路安装和维护视频监控系统不仅需要巨资投入,也是一项系统工程,时间上更不会一蹴而就<sup>[3]</sup>。而单一的入侵报警系统受到环境、小动物影响较大,误报警、漏报警在所难免<sup>[4]</sup>。因此,高铁线路防入侵需要考虑的问题有:1)安装、维护成本应低廉,适合大规模部署;2)

收稿日期:2017-02

\*基金项目:公安部技术研究计划项目(2016JSYJC61)、公安部重大研究计划项目(201202ZDYJ017)、中央高校基本科研业务经费项目(2016TJJBKY045)、铁道警察学院院级教改项目(JY2016009)资助

具备探测金属设备的功能;3)设备运行不受野外环境因素干扰;4)系统不因小动物入侵而引发误报警;5)能够长期稳定工作。

无线传感器网络(wireless sensor networks, WSN)是由大量具有特定功能的传感器节点以无线、多跳、自组网的方式实现对监测区域信息的探测、传输和处理,具有易安装、低成本、低功耗、无需布线、抗毁性强等特点<sup>[5]</sup>。因此,将 WSN 的特点应用在高铁线路防入侵方面具有重要的现实意义。

## 1 基于 WSN 的高速铁路线路防入侵系统架构设计

### 1.1 数据采集节点功能设计

WSN 是由大量低成本、安装便捷、可集成多种传感器功能的节点组成,因其功耗低性,一节普通 AA 电池可供单个节点工作很长时间<sup>[6-7]</sup>。因此,设计 WSN 节点主要集中在问题 2)~4)。

本文选用具有微功耗、高分辨率、实时探测优点的双轴线性磁阻传感器 HMC1052<sup>[8-9]</sup>探测金属设备。采用被动红外/超声波防入侵方式可排除环境干扰,选用 RE200B 热释电红外传感器<sup>[10]</sup>和 SRF08 超声波传感器<sup>[11]</sup>。由于小动物不具备携带金属设备的能力,且 HMC1052、RE200B、SRF08 工作原理不同,无串扰,采用“三技术<sup>[12]</sup>”报警输出,即排除了小动物的误报警。因此,当报警条件均成立时,系统才输出报警。若报警条件成立为“1”,不成立为“0”,则系统报警输出如表 1 所示。

表 1 系统报警功能表

红外传感器	超声波传感器	磁场传感器	输出
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

三传感器集成组合输出数据单元由 6 个功能字段组成:时间同步、节点编号(用以定位事件发生的区域)、数据(8 种组合方式:000-111)、轮计数、路由算法、报警判断(决定于“数据”字段的结果),其结构示意图如图 1 所示。

### 1.2 系统架构设计

本文结合 WSN 的技术特点和高铁线路安防现状,提

时间同步	节点编号	数据	路由算法	轮计数器	报警判断
------	------	----	------	------	------

图 1 数据单元结构示意图

出了基于 WSN 的高铁线路防入侵系统架构,如图 2 所示。

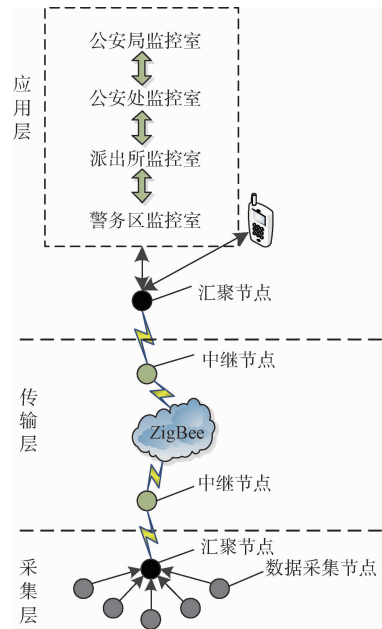


图 2 基于 WSN 的高速铁路线路防入侵系统架构

该系统自下而上分为 3 层结构:

1)采集层:WSN 的数据来自数据采集节点。在高铁线路的重要部位,通过部署数据采集节点,可实现对携带金属设备闯入封闭线路的不法分子报警信息的采集,并通过通信模块将数据发送给中继节点。数据采集节点主要由数据采集模块、数据处理和控制模块、通信模块和电源模块组成,数据采集节点的功能结构如图 3 所示。

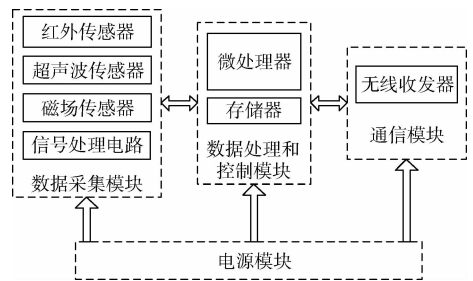


图 3 数据采集节点功能结构图

其中,被动红外、超声波、磁场传感器原理电路如图 4~6 所示。微处理器选用 TI 公司的 CC2530,通信电路和电源电路的设计可以参考文献[13]和文献[14],节点实物如图 7 所示。

2)传输层:WSN 的数据远程传输依靠由中继节点组成的 ZigBee 通信网。由于 ZigBee 技术具有低成本、低传

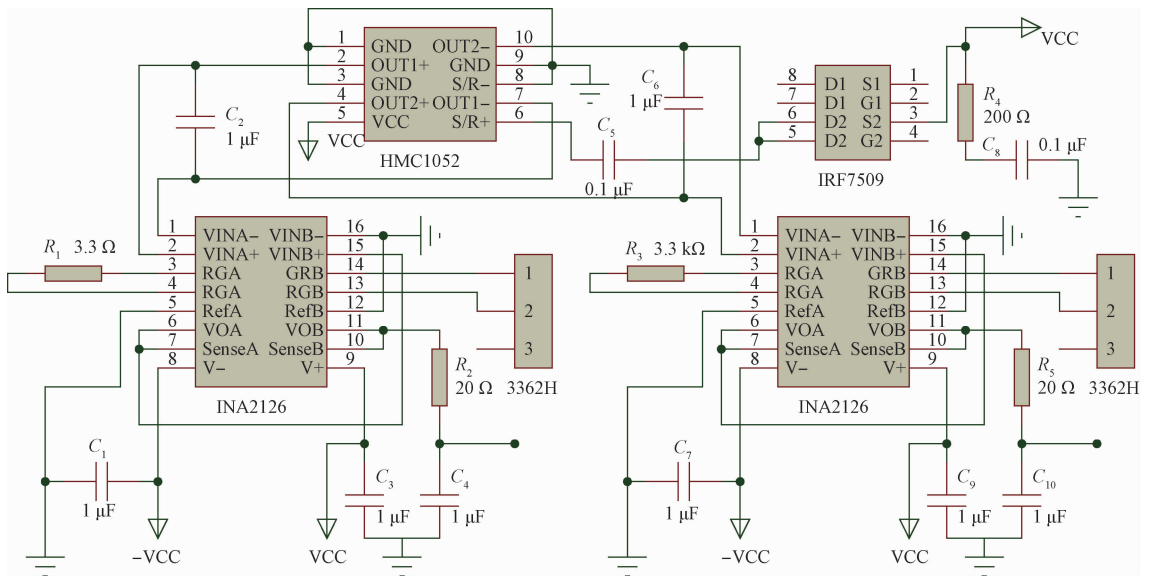


图 4 被动红外传感器 RE200B 电路原理

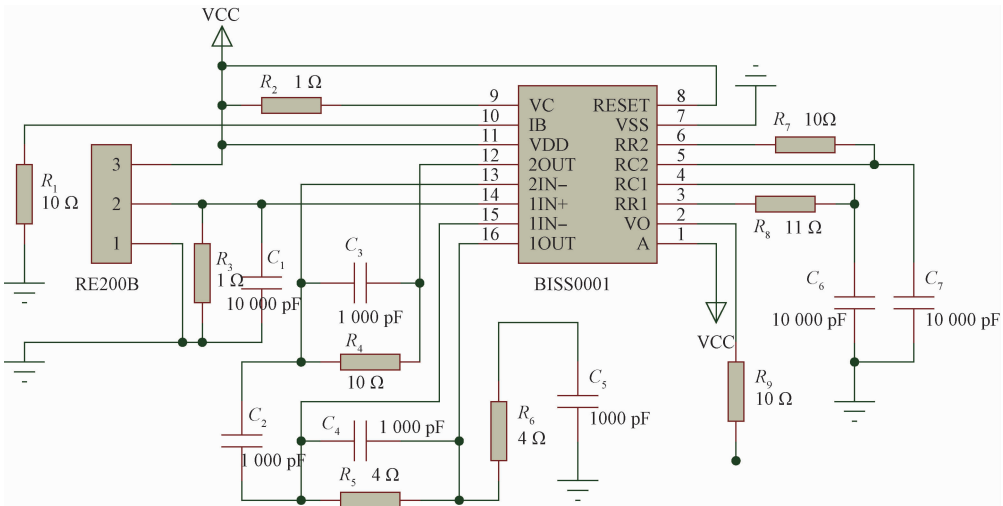


图 5 超声波传感器 SRF08 电路原理

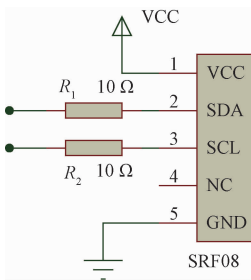


图 6 磁阻传感器 HMC1052 电路原理



图 7 数据采集节点实物

输速率、低复杂度、高安全性等特点<sup>[15]</sup>, 中继节点通过 ZigBee 技术以多跳的形式将数据采集节点的数据传至应用层。中继节点只负责数据传输不负责数据采集, 其外观属性与数据采集节点一样。

3)应用层: WSN 与外界进行数据交换依靠汇聚节点。

汇聚节点接收、处理来自传输层的数据,并将该数据上传至警务区控制室的计算机监控终端或警务人员的个人手持终端。同时,各警务区与所属派出所、各派出所与所属公安处、各公安处与所属公安局之间,通过公安内网实现四级报警监控,为应对突发案(事)件提供实时的决策信息<sup>[16]</sup>。

## 2 节点部署方案

本系统节点包括数据采集节点、中继节点和汇聚节点。数据采集节点按照防入侵需求部署在高铁线路的重要部位<sup>[17]</sup>。汇聚节点部署在两个位置:1)在数据采集节点附近,用以接收并融合采集层数据,并将该数据转发给传输层中继节点;2)在距离采集层最近的警务区监控室附近,用以接收传输层数据并转发至应用层用户。中继节点部署在数据采集节点与汇聚节点之间。由于要求系统长距离不间断工作,且中继节点使用电池供电,能量有限,要充分考虑到中继节点位置、数量与系统网络寿命之间的关系。接下来重点研究中继节点的部署方案。

### 2.1 理论设计

中继节点转发的数据单元大小与数据采集节点发送的一致。为了均衡消耗中继节点能量,对中继节点的部署采用均匀部署的方式。其发送和接收数据能耗如式(1)、(2)所示:

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec}(k) + E_{amp}(k, d) = \begin{cases} k \times E_{elec} + k \times \epsilon_{is} d^2, & d < d_0 \\ k \times E_{elec} + k \times \epsilon_{amp} d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{Rx}(k, d) = k \times E_{elec}(k) \quad (2)$$

式(1)中发送能耗 $E_{Tx}(k, d)$ 含两个变量: $k$ 表示数据发送位数(单位:bit), $d$ 表示数据发送距离(单位:m),结果包含发送电路能耗 $E_{elec}(k)$ 和放大电路能耗 $E_{amp}(k, d)$ 两部分,根据 $d$ 的不同而采用两种能耗模型:自由空间模型和多路衰减模型<sup>[18]</sup>, $\epsilon_{is}$ 和 $\epsilon_{amp}$ 分别表示在两种模型下单位距离放大电路发送单位信号的能耗。两种模型下,接收数据的能耗是一样的,由式(2)中的 $E_{Rx}(k)$ 表示。

假设中继节点转发数据单位长度为mbit, $d_n$ 为中继节点的部署间距,且只考虑其转发数据单元的能耗,记为 $E_{TR}(k, d)$ ,忽略其它状态下的能耗。则由式(1)、(2)可得:

$$E_{TR}(k, d) = \begin{cases} 2m \times E_{elec} + m \times \epsilon_{is} d_n^2, & d_n < d_0 \\ 2m \times E_{elec} + m \times \epsilon_{amp} d_n^4, & d_n \geq d_0 \end{cases} \quad (3)$$

假设传输层中第一个中继节点失效的时间 $f$ 为整个系统的网络寿命,且 $E_0$ 为中继节点的初始能量, $t$ 为中继节点数据转发周期,当每次数据转发能耗相同的条件下,那么:

$$f = \frac{E_0}{ETR} t \quad (4)$$

可见,网络寿命与转发周期呈线性关系。

由式(4)可得:

$$ETR = \frac{E_0}{f} t \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)可得:

$$f = \begin{cases} \frac{E_0 \times t}{2m \times E_{elec} + m \times \epsilon_{is} d_n^2}, & d_n < d_0 \\ \frac{E_0 \times t}{2m \times E_{elec} + m \times \epsilon_{amp} d_n^4}, & d_n \geq d_0 \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可知,当数据转发周期 $t$ 一定时,网络寿命 $f$ 是随着中继节点的部署间距 $d_n$ 的增加而减小的。由于中继节点为均匀部署,设汇聚节点与数据采集节点之间的距离为 $S$ ,中继节点的部署数量 $N$ 与间距 $d_n$ 之间的关系满足如式(7)所示:

$$d_n = \frac{S}{N+1} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)可得:

$$f = \begin{cases} \frac{E_0 \times t}{2m \times E_{elec} + m \times \epsilon_{is} \times \left(\frac{S}{N+1}\right)^2}, & d_n < d_0 \\ \frac{E_0 \times t}{2m \times E_{elec} + m \times \epsilon_{amp} \times \left(\frac{S}{N+1}\right)^4}, & d_n \geq d_0 \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可知,当数据转发周期 $t$ 一定时,网络寿命 $f$ 是随着中继节点部署数量 $N$ 的增加而增大的。

### 2.2 仿真实验

为了验证理论分析的正确性,获取合理的中继节点部署方案,需要对网络寿命与中继节点部署间距的关系进行仿真。由于系统要求不间断工作,因此考虑每2s、5s转发1次数据, $E_0$ 以一节1.5V、700mAh的AA电池能量为参考,如表2所示。

表2 仿真参数取值表<sup>[19]</sup>

参数项	数值
$E_0$	3 780 J
$E_{elec}$	50 nJ/bit
$\epsilon_{is}$	10 pJ/(bit/m <sup>2</sup> )
$\epsilon_{amp}$	0.001 3 pJ/(bit/m <sup>4</sup> )
$m$	1 000 bit
$d_n$	[0, 300] m
$d_0$	87 m

仿真工具采用MATLAB,数据转发周期分别取 $t=2$ s和 $t=5$ s,可得两种情况下网络寿命 $f$ 与中继节点的部署间距 $d_n$ 之间的关系,仿真结果如图8、9所示。

由图8、9可知,网络寿命 $f$ 随着数据转发周期 $t$ 的增加而增大,由此验证了公式(6)的结论:当数据转发周期 $t$ 一定时,网络寿命 $f$ 是随着中继节点的部署间距 $d_n$ 的增加而减小;且当数据转发周期增加时,网络寿命的最大值在增大。

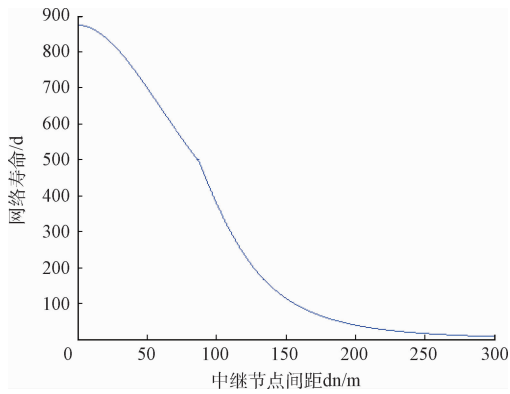


图 8 网络寿命  $f$  与中继节点的部署间距  $d_n$  之间的关系图 ( $t=2$  s)

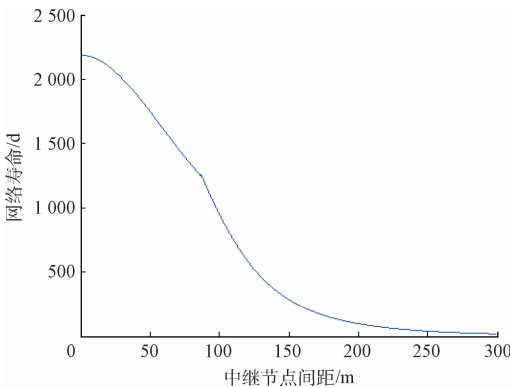


图 9 网络寿命  $f$  与中继节点的部署间距  $d_n$  之间的关系图 ( $t=5$  s)

当中继节点的部署间距为 150 m 时,通过改变数据转发周期  $t$ ,可得其与网络寿命  $f$  之间的关系如图 10 所示。

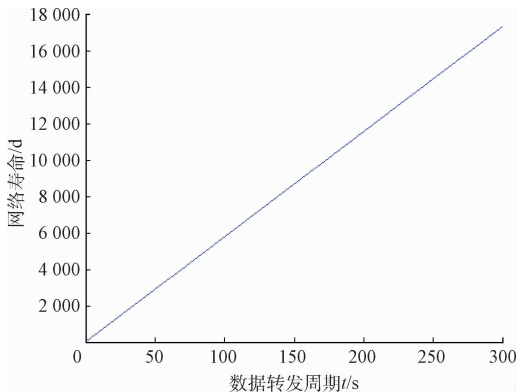


图 10 网络寿命  $f$  与数据转发周期  $t$  之间的关系图 ( $d_n=150$  m)

由图 10 可知,随着数据转发周期  $t$  的增加,网络寿命  $f$  也是随之增大的,由此验证了式(4)的结论:当  $E_{Tx}$  一定时,网络寿命  $f$  与转发周期  $t$  呈线性关系。

若在某高铁线路警务区附近部署一个由数据采集节

点组成的防入侵监测区,若该监测区距警务区 1 500 m,忽略监测区面积和遮挡因素,在确保网络寿命至少为 1~5 年的前提下,当数据转发周期  $t=5$  s 时,利用图 9、式(7)可得表 3。

表 3 中继节点理论与实际部署情况对比表 ( $t=5$  s)

网络寿命/ year	理论间距/ m	理论部 署个数	实际部 署个数	节点数 量误差
1	140	10	11	10%
2	111.3	13	14	7.7%
3	93.6	15	16	6.7%
4	70.6	21	21	0
5	44.6	33	33	0

由表 3 可知,中继节点的实际部署个数与理论部署个数相当,当  $d_n \leq 140$  m 时,误差低于 10%,且随着部署个数的增加,误差逐渐减小。同时也验证了式(8):当数据转发周期  $t$  一定时,网络寿命  $f$  随着中继节点的部署数量  $N$  的增加而增大。

## 4 结 论

本文分析了高铁线路入侵行为,结合 WSN 特点,设计了一个基于 WSN 高铁线路防入侵系统。根据系统需要,选取了被动红外、超声波、磁场传感器“三技术”以“相与”的形式输出报警数据作为系统报警输出,既兼顾了对携带金属设备入侵行为的探测,又降低环境因素和小动物带来的误报警干扰,提高了系统防入侵的可靠性。对中继节点的部署方案进行了理论设计、仿真和实例分析,显示结果与理论推导相互印证。因此,该系统能够有效防范高铁线路的入侵行为,为高速列车的行车安全提供有力保障。

## 参考文献

- [1] 蔡小培,高亮,林超,等.京沪高速铁路高架站轨道系统长期监测技术[J].铁道工程学报,2015,52(5):35-41.
- [2] 赵凌.高铁线路物联网安防系统设计[J].重庆理工大学学报:自然科学版,2016,30(5):96-101.
- [3] 吴群,王田,王汉武,等.现代智能视频监控研究综述[J].计算机应用研究,2016,33(6):1601-1606.
- [4] 李小辉,曹青松,毕彬杰.武广高铁异物侵限监测系统误报警分析及处理[J].中国铁路,2015(2):64-67.
- [5] 徐春婕,史天运,孙明慧.基于 WSN 的铁路客运站运营环境监控系统[J].计算机工程与设计,2015(4):1103-1109.
- [6] WANG ZH, WANG H, MENG Q. RLS and LMS blind adaptive multi-user detection method and comparison in acoustic communication [J].

- Instrumentation, 2015, 2(2): 47-54.
- [7] 陈岩, 高峰, 谭婷, 等. 基于 WSN 的墒情监测节点双电源设计[J]. 仪表技术与传感器, 2015(12): 117-119.
- [8] Honeywell. HMC1051/1052 1 AND2-AXIS MAGNETICSENSORS [EB/OL]. [2017-1-30] <http://html.alldatasheet.com/html-pdf/105555/ETC/HMC1051/54/1/HMC1051.html>
- [9] 吴志东, 周德华, 张晓兵. 一种低功耗磁性目标探测器研制[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(5): 1365-1368.
- [10] 李冠君, 姜国智, 姚晓楠, 等. 基于物联网技术的井下智能预警系统[J]. 电子测量技术, 2015, 38(9): 89-92, 97.
- [11] 徐建明. 超声波和热释电红外技术在室内停车库的应用与研究[J]. 仪表技术, 2015(2): 31-34.
- [12] 范晓莉, 吕立波, 杨世臣. 安全防范技术教程(修订本)[M]. 北京: 中国人民公安大学出版社, 2013.
- [13] 朱舟, 余绍俊, 于勃等. WSN 节点中能量管理方案设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(12): 1798-1805.
- [14] 鲁娟娟, 白延敏, 陈红. 平安校园智能消防监控系统设计与实现[J]. 电子测量技术, 2016, 39(5): 97-100.
- [15] 张冲, 熊勇, 房卫东, 等. ZigBee 网络性能测试系统研究[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(8): 74-81.
- [16] 王缨军. 高速铁路治安防控体系建设的思考[J]. 中国人民公安大学学报: 社会科学版, 2012, 28(6): 89-92.
- [17] 端嘉盈, 史天运. 基于 WSN 的铁路防灾安全监控系统研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(1): 85-91.
- [18] 徐新黎, 皇甫晓洁, 王万良, 等. 基于无线充电的 Sink 轨迹固定 WSN 路由算法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(3): 570-578.
- [19] 刘唐, 彭舰, 陈果, 等. 基于密度控制的传感器网络能量空洞避免策略[J]. 计算机学报, 2016, 39(5): 993-1006.

### 作者简介

赵凌, 1982 年出生, 硕士, 讲师, 主要研究方向为无线传感器网络、安全防范等。

E-mail: zenobiazh@163.com

(上接第 153 页)

- [8] 申倩伟. 基于预失真的 GaN 功率放大器线性化方法研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(8): 26-27.
- [9] 李钰, 胡坤, 罗庆, 等. 具有预失真功能的梯度波形发生器[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 19(9): 1375-1376.
- [10] 陈淑红, 袁晓峰, 余伟荣, 等. 曲线拟合法失真度测量的不确定度分析[J]. 计算机测量与控制, 2005, 13(4): 317-318.

### 作者简介

张威, 工程师, 工学硕士, 主要研究方向为电压、脉冲、失真度计量。

E-mail: xwzhang1989@126.com