

# 具有频谱感知能力的无线传感器网络 体系结构及关键技术研究

王海涛<sup>1</sup> 宋丽华<sup>2</sup>

<sup>1</sup> (解放军理工大学信息管理中心 南京 210007)

<sup>2</sup> (解放军理工大学指挥信息系统学院 南京 210007)

**摘 要** 频谱感知意识的无线传感器网络可提供无线频谱信息的采集、监测、查询、统计、分析和分发服务, 显著提高频谱资源的利用率和改善网络应用的服务性能。本文针对行业应用需求, 对具有频谱感知能力的无线传感器网络的体系结构和网络协议设计等问题进行了初步分析研究, 明确了采用分层网络架构和跨层协议设计方法, 并对网络系统涉及的频谱信息感知、信息汇聚、路由选择和网络管理等问题进行了探讨。

**关键词** 频谱感知; 无线传感器网络; 体系结构; 信息汇聚; 跨层设计

## Research on Spectrum Cognition Aware Wireless Sensor Network Architecture and Key Technologies

WANG Hai-tao<sup>1</sup> SONG Li-hua<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(*Information Management Center, PLAUST, Nanjing 210007, China*)

<sup>2</sup>(*College of Communications Engineering, PLAUST, Nanjing 210007, China*)

**Abstract** Spectrum cognition-aware wireless sensor network can provide wireless spectrum information collection, monitoring, queries, statistics, analysis, and distribution services, significantly improving the utilization of the scarce spectrum resource and service performance of network applications. In this paper according to the application needs of industry, spectrum-aware wireless sensor network architecture and network protocols design problems are analyzed and studied preliminarily and hierarchical network structure and cross-layer protocol design methods are identified. In addition, spectrum cognition, information aggregation, routing selection and network management issues involved in network system design are discussed.

**Keywords** spectrum cognition; wireless sensor network; architecture; information aggregation; cross-layer design

## 1 引 言

当前, 移动无线网络发展速度迅猛, 应用领域和样式众多, 广大消费者对无线频谱的需求越来越大且无线频谱资源的分配极不合理, 从而造成频谱资源日益紧张。无线频谱资源是国家经济建设和国防建设不

可或缺的有限战略资源, 目前频谱分配主要采用固定分配方式, 这种方式非常低效和呆板, 使得有限的频谱不论在时间和空间上都没有得到充分利用。为此, 业界提出了基于动态频谱感知和伺机频谱接入的新型频谱分配策略, 允许非许可用户 (ULU) 伺机利用许可用户 (LU) 未使用的频带来提高频谱资源的利用率。为了实现伺机频谱接入, 首先必须能够准确、全面监

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61072043)。

**作者简介:** 王海涛, 博士, 副教授, 研究方向为无线自组网、应急通信和网络信息管理; 宋丽华, 博士, 副教授, 研究方向为网络测量和性能优化。

测频谱资源的使用状况。电磁频谱会受到各种干扰, 而且干扰的种类、频率范围和持续时间都没有规律, 使得电磁频谱的监测、管理、分配和使用面临诸多问题。为保障频谱资源合理有序的使用和无线通信网络的高效运行, 需要运用先进的技术手段和设施, 对无线电磁频谱环境状况进行分析与评估。

作为先进的信息获取和处理技术, 无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)已经在军事国防、工业、农业、商业、公共管理、医疗卫生和应急抢险等领域得到了广泛应用。本文考虑利用无线传感器网络开展无线电磁频谱监测和信息收集工作, 以便及时掌握无线频谱资源变化情况, 监测核查无线台站发射功率、频率带宽、调制方式等射频参数, 完成相关监测资料的上传和分析, 为科学合理规划无线频谱资源的使用, 提高频谱资源的整体利用效率提供技术支持。例如, 在农业水利方面, 水利部门部署了许多无人值守的监控设备可以对汛情、灾情和其他情况进行实时动态监控和报告, 由于监控目标所处位置大多偏僻、分散且布线困难, 所以多采用无线信号进行传输, 因而非常适合利用传感器实现对水利无线通信信号的监测、分析和统计。本文重点关注分布式电磁频谱感知无线传感器网络体系结构的设计, 跨层设计、路由协议和网络管理等相关技术的研究, 为开发适用于多种应用领域具有电磁频谱感知和监测能力的无线传感器网络奠定技术基础。

## 2 网络体系结构

具有电磁频谱感知和监测能力的无线传感器网络采用三级网络构架来实现分布式无线频谱监测、分级汇总和统计上报, 如图 1 所示。整个网络包括电磁频

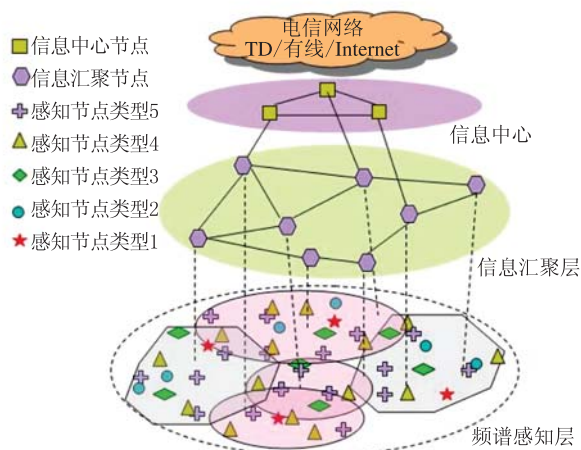


图 1 系统架构示意图

谱感知层、信息汇聚层和信息处理中心三级。电磁频谱感知层由 5 类电磁频谱感知节点设备构成, 覆盖了 6 GHz 以下的所有电磁频段的频谱监测信号; 信息汇聚层实现感知区域内感知节点的感知信息接入及感知数据的聚合、检索和管理功能; 信息中心负责无线传感器网络的系统管理和全网电磁频谱数据的汇总和信息融合, 实现分布式协同信号识别分类和定位跟踪以及电磁频谱态势发布功能。

### 2.1 频谱感知层

电磁频谱感知层由 5 类电磁频谱感知节点设备构成, 分别为感知节点类型 1(3 MHz 以下)、感知节点类型 2(3~30 MHz)、感知节点类型 3(30 M~300 MHz)、感知节点类型 4(300 M~3 GHz) 和感知节点类型 5(3 G~6 GHz)。各传感器节点通过扫描特定频段的信号, 协同工作以实现全频段内的信号监测要求。具有频谱感知能力的无线传感节点负责信号检测、定位和跟踪以及信号的特征提取和采集, 实现对信号的初步分析和处理。针对频谱监测对象, 感知节点组成监测子网。监测结果通过无线手段传送到信息汇聚节点。频谱感知节点由频谱监测模块、信号处理模块、存储模块和通信模块等主要部分构成, 如图 2 所示。

### 2.2 信息汇聚层

信息汇聚层由多个传感网汇聚节点通过自组织方式互联构成, 以满足较大区域覆盖的需求。汇聚节点具备较强的信息处理和传输能力, 负责实现本区域内各感知节点的接入及数据的聚合、查询和管理。与频谱感知节点类似, 网络汇聚节点也主要包括处理模块、通信模块和感知模块构成。信息汇聚层对上接入信息中心, 对下可接入多种频谱感知节点。另外, 各传感器感知子网可以接入不同的信息汇聚节点, 每个信息汇聚节点亦可同时接入多个传感器感知子网, 从而在感知子网和汇聚节点间形成多对多网络架构, 如图 3 所示。

### 2.3 信息处理中心

信息中心节点负责整个传感网的管理和集中配置, 提供分布式数据聚合和信息融合能力, 以支持协同信号识别分类和定位跟踪功能。其中, 针对被监测信号, 采用多传感器节点协同的方式进行监测; 针对信号的定位和跟踪需求, 利用多个传感器节点对被测信号到达时间、信号强度等特性进行监测, 在信息中心节点进行汇聚处理从而实现目标信号的实时定位和跟踪。针对信号的分类和识别, 采用感知节点局部决策与信息中心全局决策相结合的方法, 提高信号识别

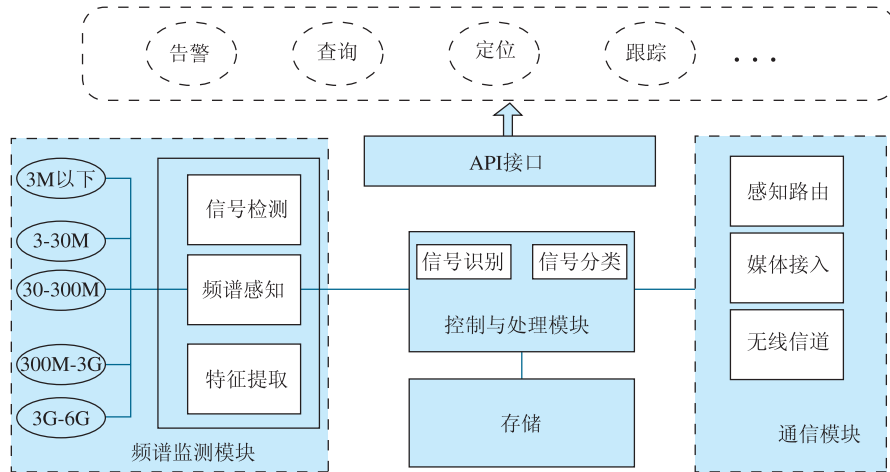


图2 频谱感知节点的功能结构

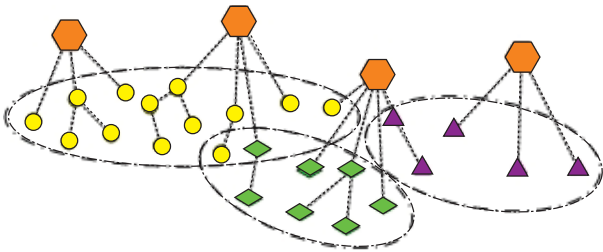


图3 传感器监测子网和汇聚节点的多对多接入结构

分类的正确性，并降低信息聚类冗余度，增强电磁环境感知的准确性和及时性。信息中心节点通过有线/无线方式与多个汇聚节点连接，通过宽带无线接入系统或 Internet 接入到其他网络中。无线传感器网络可根据网络规模和应用需求由多个信息中心节点构成分布式信息处理平台，以便更好地实现信息实时处理、融合处理或存储处理。

### 3 网络协议栈

具有频谱感知能力的无线传感器网络分层协议栈以数据为中心，主要包括物理层、媒体接入层、网络层、传输控制和业务应用层，如图4所示。其中，物理层和 MAC 层主要解决无线信号编码调制、介质访问、冲突避免和差错控制等问题；网络层主要解决数据在网络中的传输问题，通过路由协议完成数据在网络内的寻址路由，通过频谱感知模块实现动态频谱资源的实时感知和分配，实现基于频谱感知降低能耗的路由策略；传输层主要解决拥塞和流量控制等问题，提供对监测数据的实时或近实时的 QoS 高效数据传输。业务应用层主要面向信号定位、追踪及频谱态势等各类应用，为不同用户提供各自所需的服务。

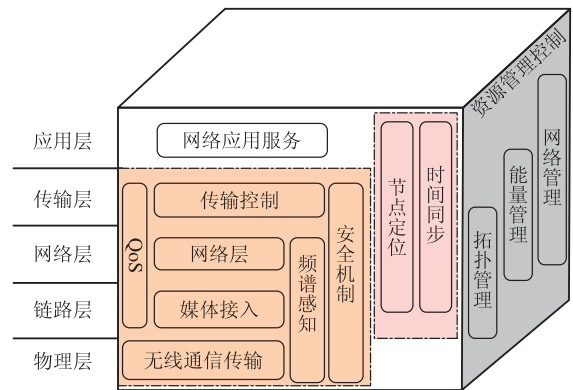


图4 网络协议栈功能框图

频谱感知无线传感器网络具有动态、灵活、智能的特点，因而对网络协议的要求也比较高，要求协议具有异步、实时的特点，必须能够自动适应因节点变动、无线环境变化而带来的可用频谱资源和网络拓扑结构的动态改变。此外，网络协议栈还涉及资源管理控制、安全、QoS 保障机制和时间同步等功能。其中，资源管理控制主要包含拓扑管理、能量控制和网络管理，它们充分利用跨层信息交互来实现网络系统整体性能的改善，综合考虑应用需求和网络资源情况，提供优化的资源配置和管理功能；系统安全和 QoS 保障机制贯穿协议占各层，为应用服务提供安全和 QoS 技术保障；时间同步为各节点提供统一的工作时钟，满足信息融合处理功能对监测信号的协同识别时间要求。

### 4 频谱感知无线传感器网络关键技术分析

频谱感知无线传感器网络的设计和实现必须从无

线传感器网络的行业应用对电磁频谱监测的需求出发, 分析无线传感器网络电磁频谱感知的功能要求和特点, 在上述频谱感知无线传感器网络分层网络架构的基础上, 系统研究分布式电磁频谱感知、信号协同识别分类、定位与跟踪算法, 设计面向频谱感知传感器网络应用的网络协议, 实现网络通信协议栈、网络控制管理和信息融合处理功能。

#### 4.1 基于频谱感知的组网设计

基于频谱感知的动态组网协议必须以提高频谱监测传感器网络的有效性和可靠性为设计目标, 具体设计思路如下: 组网协议采取基于层次的网络结构, 以提高传感网的可扩展性, 支持分布式频谱监测、定位跟踪和频谱感知信息的无线传输。当某频段的感知节点未监测到频谱异常时, 网络协议可以在满足频谱感知监测的前提下, 尽量关闭冗余节点。各感知节点可以自发地或由汇聚节点控制来合理使用网络资源, 以保证应用服务要求。当感知节点附近的频谱状态发生异常时, 处于工作状态的感知节点发现异常后, 通过汇聚节点上报告警信息, 并以自组织协商或汇聚节点指派的方法, 来激活一定数量的闲置节点, 共同进行快速准确的分布式定位跟踪。各感知节点上报的告警信息可以在汇聚节点进行数据压缩或数据融合, 以减轻网络资源占用。在调用感知节点进行分布式定位跟踪时, 可以利用感知节点的位置信息来协助进行分布式定位, 并优化网络路由。当中心节点接收到频谱异常的告警信息后, 可以按照其需求在网络中挖掘相关信息。

针对多跳传感器网络自组织、动态频谱接入的特点, 在选路的同时确定路径每一跳使用的频段。综合考虑其他数据流和沿途不同频段分配对多跳路径造成的时延, 充分发挥频谱感知传感网络的自主频段选择、频谱空间复用的优势, 适应无线电频谱环境变化和网络拓扑变化, 提高网络的频谱利用率和传输吞吐量, 降低端到端数据传输时延, 改善网络整体性能。

#### 4.2 联合数据链路层和物理层的跨层设计

为了合理、高效地利用无线频谱资源, 在多传感节点频谱感知共存条件下实现高可靠通信, 需要对节点间的链接进行有效的控制和管理, 这主要涉及到对物理层和数据链路层相关协议进行跨层优化设计, 如图 5 所示。物理层主要完成数据传输功能, 链路层主要包含簇管理、链路管理和媒体接入控制(MAC)三个功能模块。而频谱感知和控制信道模块跨越物理层与数据链路层。其中, 频谱感知模块用于监测并感知

传输信道的频谱使用情况, 控制信道随节点间频谱占用情况动态变化, 负责传送传感器节点间的控制和通信频段感知信息。网络通过控制信道进行簇头的选择和簇的管理维护。链路管理模块负责两个节点之间的通信建立和链路维护。在无线传感器网络中, MAC 层协议要实现两大功能: 一是建立网络基础设施所需的数据通信链路; 二是协调共享介质的访问, 以便节点能公平有效地分享通信资源。

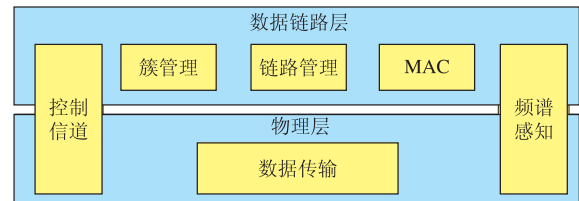


图 5 数据链路层和物理层的联合跨层设计

#### 4.3 频谱感知意识的 QoS 路由协议设计

迄今, 针对无线传感器网络提出了大量路由协议, 简单说明如下:

(1) 以数据为中心的路由协议: 此类协议基于数据查询服务, 对监测数据按照属性命名, 对相同属性的数据在传输过程中进行融合, 从而减少冗余数据的传输, 典型代表包括 Gossiping、SPIN 协议和定向扩散(Directed Diffusion)协议;

(2) 基于地理位置的路由协议: 此类协议利用节点的地理位置信息, 通过把数据传送到指定区域而不是整个网络来降低能耗, 典型代表包括 GPSR 和 GEAR。

(3) 基于网络流的路由协议: 此类协议在提供数据路由功能的同时考虑网络流的特点, 满足网络流的某些服务质量要求。

(4) 基于簇的路由协议: 此类协议将传感器网络划分为多个簇, 各簇包含一定数量的传感器节点, 并选出一个汇聚节点。监测数据先由传感器节点传给汇聚节点, 再由汇聚节点转发到信息中心节点, 典型代表包括 LEACH 和 TEEN。

频谱感知意识的 QoS 路由协议设计, 既要考虑无线传感器网络中满足 QoS 要求的路径选取问题, 又要考虑认知无线网络动态频谱接入带来的特殊问题。尽管 QoS 路由问题已经得到了广泛关注, 但是由于无线传感器网络的自身特点, 现有 QoS 路由方案仍面临许多亟待解决的难题。例如, 无线传感器网络在网络动态拓扑结构特性和无线链路的时变特性共同影响下, 精确的网络状态信息传播和维护非常困难, 加大了 QoS 路由协议设计和实现的复杂程度。

频谱感知意识的 QoS 路由协议采用基于层次的混合路由协议, 根据传感器网络特性, 将其分为两层: 传感器节点和汇聚节点(簇头)之间采用先验式路由协议(簇内协议); 汇聚节点之间采用反应式路由协议(簇间协议)组成多跳自组织网络。传感节点的数据首先通过簇内协议传送到汇聚节点, 汇聚节点经过简单的数据融合后, 通过簇间协议把数据传送到信息中心。

频谱感知意识的 QoS 路由协议考虑以带宽、时延和节点能量水平作为 QoS 度量指标, 可以满足大部分应用场合下多种应用的 QoS 服务需求。如果在实际应用中需要更多的路由度量, 那么可以利用带宽, 时延度量和能量水平作为初选方案, 选出备选路由, 然后再利用其他的度量准则选定所需的路由。这种方法类似于准入控制, 大大简化了 QoS 路由算法的复杂性。在 QoS 路由协议的具体实现上, 需要联合物理层、MAC 层等多个层次来进行路由协议的设计, 充分利用底层信息进行设计优化。

#### 4.4 网络管理机制

无线传感器网络的数据传输需要满足带宽、时延和能量约束等网络性能指标要求, 网络管理综合考虑应用需求和网络资源情况, 提供优化的资源配置和管理功能。在考虑网络资源利用率、网络负载均衡度、业务 QoS 要求、节点的移动性等因素的基础上, 网络管理还涉及移动性管理、配置管理、安全功能和同步定位管理等研究内容。

移动性管理需要考虑高效的垂直切换决策机制和切换实施方法, 通用的位置管理机制、位置更新与查找策略、移动性接入认证技术以及终端间协作的移动性管理技术等。

配置管理提供传感节点设备、汇聚节点设备、信息中心节点设备工作模式参数配置功能, 包括组网模式、通信能力、传感器支持能力、服务支持能力、采用的信道、网络标识、加密方式、鉴权方式、密钥、基本速率、发送速率等。此外, 无线传感器网络配置管理可依据应用需求、系统运行环境和服务环境的变化, 支持系统动态配置的实现。

同步定位管理主要负责数据源同步、传输同步和表现同步。数据源同步在数据采集区域通过多点数据融合完成数据源的同步。传输同步在传感数据传输调度时, 采用截止时间加权优先的排队调度策略, 提高滞后数据流的转发优先级, 尽力保证及时转发。表现同步在应用层实现, 利用传统的基于时间轴的业务流同步和缓存技术来提高流间的同步性能。

定位管理包括基于测距的定位技术和无需测距的定位技术, 无线传感器网络主要采用基于测距的 TDOA 定位技术, 完成各个节点和频率源的定位。

安全管理主要负责确保网络系统的数据机密性、数据完整性、数据真实性和数据新鲜性。

## 5 结束语

频谱感知意识的无线传感器网络可提供电磁频谱感知信息的获取、监测、查询、统计和分发服务, 可以显著提高频谱资源的利用率和改善网络应用的服务性能。本文针对行业应用需求, 对具有频谱感知监测能力的无线传感器网络的体系结构和网络协议设计问题进行了初步分析研究, 明确了分层网络架构和跨层协议设计方法。今后, 需要考虑针对特定的应用场景设计典型的频谱感知传感器网络的原型系统, 研究满足应用需求的低功耗和小型化设备实现方案并进行一体化设计, 开展感知节点设备、汇聚节点设备和信息中心设备的原理样机研制, 通过典型应用场景的演示试验来验证采用的技术手段的科学性和有效性。

## 参考文献

- [1] 许毅. 无线传感网原理及方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [2] 刘浩, 唐培和. 无线传感网络中能耗平衡的传输策略 [J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(33): 112-114.
- [3] Akyildiz I F, Su W L, Sankarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 104-112.
- [4] Sutton P, Doyle L E, Nolan K E. A reconfigurable platform for cognitive networks [C] // Proceedings of the International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, Mykonos Island, Greece, 2006: 231-238.
- [5] 陆佃杰, 黄晓霞. 认知无线电在无线传感器网络中的应用 [J]. 先进技术研究通报, 2009, 11(3): 18-22.
- [6] Ghasemi A, Sousa E S. Spectrum sensing in cognitive radio networks: requirements, challenges and design trade-offs [J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(4): 32-39.
- [7] 王海涛, 刘晓明. Ad hoc 网络中跨层设计方法的研究 [J]. 电信科学, 2005, 21(2): 22-26.
- [8] Hillenbrand J, Weiss T A, Jondral F K. Calculation of detection and false alarm probabilities in spectrum pooling systems [J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9(4): 349-351.
- [9] Chen D Z, Varshney P. QoS support in wireless sensor networks: a survey [C] // International Conference on Wireless Networks,

- 
- 2004: 227-233.
- [10] Akayya K, Younis M. An energy-aware QoS routing protocol for wireless sensor networks [C] // Proceedings of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, 2003: 710-715.
- [11] Heinzelman W. Application-specific protocol architectures for wireless networks [D]. Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [12] Perillo M. Providing application QoS through intelligent sensor management [C] // IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications, 2003.

# 基于无线传感器网络车速监测算法

张足生<sup>1,2</sup> 陈亮<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(东莞理工学院 东莞 523808)

<sup>2</sup>(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

**摘要** 为了构建基于无线传感器网络的大规模、低成本、低功耗的交通信息采集系统,本文提出了一种车辆速度检测算法。将一跳通信范围内的路由节点和多个传感器节点看成是一个子网,路由节点实现子网内的时间同步和车速计算。通过实验验证了该车速检测算法的精度可达到 95% 左右。

**关键词** 无线传感器网络; 智能交通; 车速监测; 时间同步

## A Vehicle Speed Detection Algorithm Based on Wireless Sensor Networks

ZHANG Zu-sheng<sup>1,2</sup> CHEN Liang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

<sup>2</sup>(Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

**Abstract** In order to build the wireless sensor network based large-scale, low-cost, low-power traffic information collection system, this paper proposes a vehicle speed detection algorithm. We divide the network into many subnets, and one subnet consists of one router and multiple sensor nodes. The router conducts time synchronization and vehicle speed computing for its subnet. The vehicle speed detection accuracy of the algorithm is verified by experiments.

**Keywords** wireless sensor networks; intelligent transportation systems; vehicle speed detection; time synchronization

## 1 引言

城市的发展、汽车的普及给交通带来极大的压力。由此引发的道路阻塞、环境污染等问题严重地困扰着世界各大城市,智能交通系统(Intelligent Transportation System, ITS)应运而生。无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是一种融合无线通讯技术、微电子传感器、嵌入式系统的新技术<sup>[1]</sup>,逐渐被用于交通信息采集领域<sup>[2,3]</sup>。将传感器节点部署在车辆、路面、停车场、及交通设施上,利用自组织网络方式将节点采集到的信息经过汇聚处理,实现实时准确的车辆检测、定位、识别、跟踪,获取全面的全路网道路交通信息,以进行交通决策,为人们的出行提供便利。

本文利用磁场扰动车辆检测原理,研究基于 WSN 的车辆速度检测算法。现有算法<sup>[4,5]</sup>大都以基站节点实现时间同步和车速计算,随着传感器节点到基站跳数的增加,时间同步的误差越大,从而导致车速检测的精度降低。本文将 WSN 划分为多个子网,每个子网由一个路由节点和多个传感器节点组成,传感器节点采集的车辆信息通过一跳上传到路由节点,路由节点实现子网内的时间同步和车速计算。我们在道路上部署了车速监测实验系统,实验结果验证了该车速检测算法的准确度达到 95% 左右。

## 2 交通检测

目前已经有多种技术应用于道路动态车辆检测,例如:GPS<sup>[6]</sup>、视频<sup>[7]</sup>、线圈<sup>[8]</sup>、微波雷达<sup>[9]</sup>等。这

基金项目:国家自然科学基金(61271005);深圳市科技基金(CXB201104220033A, CXZZ20120831173053551)。

作者简介:张足生,博士,助理研究员,研究方向为无线传感器网络、智能交通系统, E-mail: zushengzhang@163.com; 陈亮,工程师,研究方向为无线传感器网络、嵌入式软件,软件工程。