

面向频谱感知的 WSN 宽频带监测系统设计

王景晖¹, 金 梁¹, 张 鑫²

(1 国家数字交换系统工程技术研究中心, 河南 郑州 450002;

2 大唐联诚信息系统技术有限公司, 北京 100191)

摘 要: 提出了一种面向频谱感知的无线传感器网络 WSN 宽频带监测系统设计方案. 该系统采用了分频段协作感知和感知结果融合的处理机制, 可以实现多频段频谱的同步和宽频带感知. 进而设计了频谱感知节点和汇聚节点, 提出了一种适用于 WSN 宽频带监测的改进 LEACH 分簇路由协议, 并进行了系统能耗分析. 最后, 采用 NS2 仿真工具对系统能耗、数据服务类型和使能型路由选择策略进行了仿真实验验证. 仿真结果表明, 此设计方案可使系统能耗达到均衡, 从而有效延长系统的生命周期.

关键词: 无线传感器网络; 频谱感知; 宽频带监测; 分簇路由协议; 系统能耗

中图分类号: TN915.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)03-0006-05

Design of the Wideband Monitoring System in Spectrum Sensing WSN

WANG Jing-hui¹, JIN Liang¹, ZHANG Xin²

(1 China National Digital Switching System Engineering and Technological Research Center,
Zhengzhou 450002, China; 2 Datang Linktech Infosystem Co., Ltd., Beijing 100191, China)

Abstract: A WSN-based novel wideband monitor system in spectrum sensing is proposed in this paper. By using the mechanism of cooperative sensing with frequency dividing and sensing data fusion, the functionalities of multi-band synchronization and wideband spectrum sensing are implemented in this system. Meanwhile, the architecture of spectrum sensing nodes and the sink nodes were designed, an improved LEACH clustering protocol suitable for wideband spectrum sensing WSN was proposed, and the corresponding energy consumption was analyzed. Finally, a simulation is carried out on NS2 for verification of system energy consumption, data service types, and the enabled routing strategy of this system. The simulation results show that, the improved LEACH clustering routing protocol achieves an energy consumption balance, and therefore can prolong the system lifecycle effectively.

Key words: wireless sensor networks; spectrum sensing; wideband monitoring; routing protocol clustering; system energy consumption

1 引言

无线传感器网络(WSN)^[1-3]是由大量处于静态或者动态的传感器节点以自组织或者多跳的方式构成的网络,其中传感器节点均具有通信、计算和网络功能,各节点间采用相互协作的方式实现对规划区域内数据的采集、传输与处理,从而完成目标区域的宽频带监测

任务. 频谱感知无线传感器兼有电磁频谱感知和无线通信的能力,所组成的 WSN 可用于开展频谱感知和监测分析与统计等工作,且具有布设方便、成本低及鲁棒性强等优点^[4-5]. 文献[6]提出了面向宽频段频谱感知的无线传感器网络系统架构和分布式分簇算法. C Guo 等提出了一种基于簇结构的协作频谱感知算法^[7],李鑫等分析了群规模、信号感知概率及感知时延三者间

的关系^[8].以上成果均侧重于频谱感知无线传感器网络的框架设计、分簇算法和信息处理方法,缺乏对宽频带感知系统的整体设计及仿真分析.

2 系统拓扑结构

频谱监测可以提高频谱的有效利用率和电磁信号的安全检测级别.将频谱感知监测设备组网形成频谱感知无线传感器网络,还可以进一步弥补单一设备对频谱带宽监控不足的缺陷.图1所示为频谱感知 WSN 的拓扑结构,由监控区域内布设的传感器节点、传感器汇聚节点、远程通信信道、任务管理与业务处理中心组成.

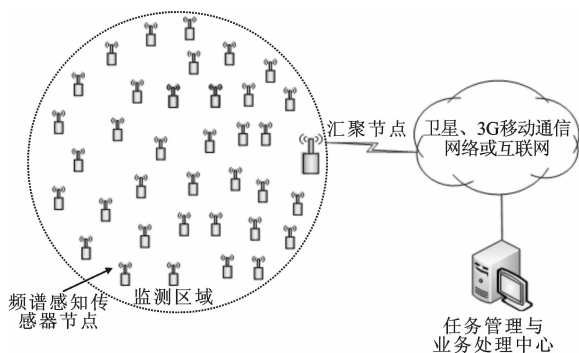


图1 频谱感知 WSN 系统拓扑结构示意图

大规模频谱感知传感器节点随机或均匀地部署在监测区域内部或附近,各传感器节点既可以辨别出新的信号,同时也可以对某些特定的信号进行测向和定位,并以抵近方式接收各种信号,以获得良好的接收效果.传感器节点间通过自动连接的方式构成无线网络,每一个传感器节点都可以凭借路由的选择结果以逐跳方式将数据传输到汇聚节点,汇聚节点利用人造卫星、公共移动通信网络或者 Internet 互联网,将接收到的监控数据送达任务管理及业务处理中心.该中心兼具备多种业务处理能力,可对来自各个方向区域的监测信号进行监听和筛选.对感兴趣的信号,还可以采用专用的解调处理设备进行处理.并且,无线网络管理人员还可以在该中心进行远程的网络检测、配置以及管理.

3 宽频带监测系统关键技术

3.1 频谱感知节点设计

频谱感知传感器节点为电池自供电的微型嵌入式系统,由传感器、AD 转换器、DA 转换器、处理器、射频电路、天线、电源和相关接口组成,其框架结构如图2所示.频谱感知节点主要完成频谱数据采集、

分析与处理等工作,以无线方式将电磁特征参数传输到汇聚节点.处理器采用 STM32 + FPGA 嵌入式处理器系统,该系统具有丰富的存储资源和接口,易于集成外围器件.无线收发模块选用 CC2510 射频芯片,采用了直接序列展频技术,并可以兼容 IEEE802.15.4/Zigbee 通讯方式.此外,该类节点还内置了收发射频开关与硬件 MAC 加密,支持 AES-128 算法及数字 RSSI/LQI.

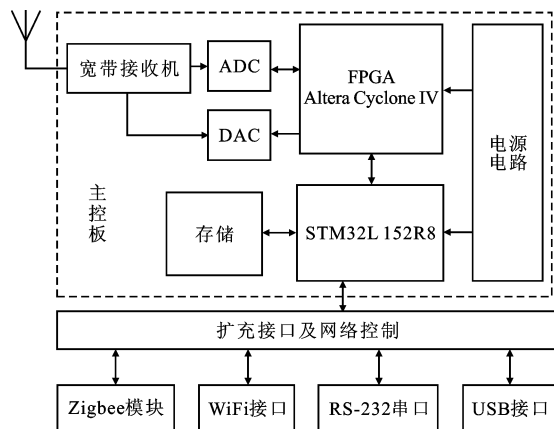


图2 频谱感知节点结构示意图

各频谱感知节点采用分频段协作的模式实现对目标频段的宽频带监测.首先,假设系统监测频段上下界分别为 F_1, F_2 ,区域内有 n 个节点.令

$$F = F_1 - F_2 \quad (1)$$

同时将感知任务的频段 $[F_2, F_1]$ 等分为 n 个监测子频段 F/n .其次,假设监测网络中的传感器节点在预先设定的监测频段内以单次最小处理带宽 b 进行循环扫描检测,并通过双门限能量检测方法获得最小处理带宽 b ,从而完成模拟信号与数字信号调制方式的识别和相关参数的估计.其中,数字信号调制方式包括 QPSK, 8PSK, 16QAM, 2ASK, 4FSK 及 dB-PSK,模拟信号调制方式包括 AM, BAM, PM, FM 及 DSB,估计的参数则包括信号的中心频率、信噪比、带宽和波特率等信息.最后,频谱感知节点会从监测子频段 F/n 中检测出多个最小处理带宽 b 的调制方式和参数估计结果,并将其进行融合处理,从而准确无误地完成监测区域内判决结果的设计,同时将判决结果传输到汇聚节点.

假设节点之间使用的通信频率为 f_c ,且 $F_2 < f_c < F_1$.由于节点间的通信频带很窄,在节点间进行分频段检测时,群内节点通信会对某个节点的感知造成同频干扰.为了解决这个问题,节点间的信号传输机制采用 TDMA 模式^[6].并且,针对每个感知节点,当该节点在循环扫描频带 f_c 时,如果检测出对

感知造成干扰的节点,就要求其不进行数据发送。

3.2 汇聚节点设计

汇聚节点主要负责监测区域内各传感器节点的接入及数据的聚合、查询和管理等工作,多种频谱的传感器节点信息可以通过汇聚节点汇聚至信息中心。该类节点由信息处理模块和通信接口模块组成,其硬件结构如图3所示,由高性能嵌入式处理器 ARM S3C6410、存储单元、电源、各类通信接口等部件组成,可以与业务处理中心以卫星、WiFi、公共移动通信网络或互联网方式进行互联。

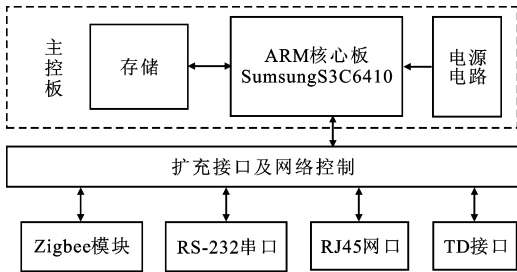


图3 汇聚节点结构示意图

3.3 WSN 分簇路由协议

为了对监测区域(尤其是重点区域)的电磁特征参数进行精确、实时及有效的监测,需要在该区域空间内布设众多的感知节点。同时,为了能够有效管理上述节点,实现频谱感知的分频协作,传感器节点的网络通信应该采用分簇的层次型路由协议来完成。首先簇首选举,被确定为簇首的节点应广播当选信息。其他节点依据与簇首的距离和自身剩余的能力选择加入簇,完成簇的构建。簇首节点将收集到的普通节点信息进行融合,并将融合后的结果发送给汇聚节点。

本系统所采用的 WSN 分簇路由协议根据节点剩余能量对常规的 LEACH 协议进行了改进。改进协议假设感知节点在频谱感知系统中是均匀分布的,将全部感知节点进行分簇。节点分簇以“轮”为工作单位,分簇从开始到完成为一轮。每完成一轮分簇后,在进行新一轮分簇时,需要重新选择簇首节点。具体而言,该 WSN 分簇路由协议的步骤如下所示。

步骤1:邻居检测。在每一轮的开始进行必要的初始化;

步骤2:簇首选择。为无线传感网络中每个节点生成一个介于 $[0,1]$ 区间的随机数,将这个随机数与阈值 $T(n)$ 进行比较,其中,

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P[r \cdot \text{mod}(1/P)]} \frac{E_{n_current}}{E_{n_max}}, & n \in G \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中, P 表示网络中簇首个数占所有节点个数的百分比; r 表示当前运行轮数; G 表示最近在 $1/P$ 轮中还没有选择作为簇首的节点集; $E_{n_current}$ 表示新一轮开始时传感器节点的能量; E_{n_max} 表示节点的初始能量。当某一节点生成的随机数大于阈值 $T(n)$ 的设定值时,便将该节点选举为簇首节点并将当选信息进行广播,否则该节点为普通节点。如果一轮工作周期结束前该簇首节点收到其他节点当选簇首的信息,则将该节点加入到候选簇首列表,使之成为列表中的成员。

步骤3:簇的组建。节点通过簇首选择算法成为簇首后,簇首节点会根据节点位置距离及剩余能量选择普通节点加入其所在的簇,同时将该普通节点加入簇的信息进行广播,而其他非簇首节点收到该广播信息后,将该簇首节点加入到自己的备选簇首列表中。当簇内节点数达到上限后,就会拒绝新节点的加入。

步骤4:后期调整。协议同步进入后期调整阶段,孤立的普通节点申请加入两跳内的其他非孤立簇节点的簇。

步骤5:数据传输。数据在特定时隙范围内由普通节点传送到簇首节点,并通过簇首节点将收集到的数据传送给汇聚节点。

3.4 系统的能耗分析

系统进行频谱感知的能耗主要来源于节点的频谱感知能耗、感知结果的传输能耗、簇首接收各发送节点感知结果的传输能耗、综合判决能耗和判决结果发送到汇聚节点的传输能耗等过程。因而,系统发送1 bit数据所消耗的能耗为

$$E = pE_{\text{detect}} + q(E_{T_x} + \xi_{\text{amp}} d_{\text{toCH}}^2) + qE_{R_x} + E_{\text{DF}} + (E_{\text{elect}} + \xi_{\text{amp}} d_{\text{toSink}}^2) \quad (3)$$

式中, ξ_{amp} 表示传输放大器增益; E_{detect} 表示节点 i 进行频谱感知的能耗; $(E_{T_x} + \xi_{\text{amp}} d_{\text{toCH}}^2)$ 表示节点 i 将感知结果传送给簇首节点所消耗的能耗; E_{R_x} 表示簇首节点 i 接收各发送节点发送感知结果的能耗; E_{DF} 表示簇首节点综合判决能耗; $(E_{\text{elect}} + \xi_{\text{amp}} d_{\text{toSink}}^2)$ 表示簇首节点将综合判决结果发送到汇聚节点的能耗。

由式(3)可以看出,假设 E_{detect} 、 E_{T_x} 、 ξ_{amp} 、 E_{R_x} 、 E_{DF} 和 E_{elect} 一定时,系统的频谱感知能耗与感知节点数 p 、发送节点数 q 、发送节点与簇首节点之间的距离 d_{toCH} ,以及簇首节点与汇聚节点之间的距离 d_{toSink} 有关。因此,需要对以上影响系统功耗的因素进行合理的处理,使系统能耗尽可能地减小,进而延

长 WSN 系统进行频谱感知的生命周期。

4 仿真实验与分析

为了分析频谱感知 WSN 宽频带监测系统的性能,同时,为了验证改进后的分簇算法的有效性,本文采用 NS2 仿真工具搭建了基于频谱感知的无线传感器网络仿真模型,该模型选定 500 m×500 m 范围内的 49 个频谱感知无线传感器节点和 1 个汇聚节点作为系统应用场景. 系统仿真实验参数设置如表 1 所示.

表 1 仿真中的参数设置	
参数名称	参数值
无线传输模型	FreeSpace
网络接口类型	WirelessPhy/802.15.4
Mac 类型	Mac/802.15.4
数据流	CBR
数据包大小	1 kb
报文产生速率	10 Packet/s
模拟总时间	3 500 s

实验中频谱感知能耗 $E_{\text{detect}} = 40 \text{ nJ}$, 感知节点发送感知结果的数据传输能耗为 $E_{\text{Tx}} = 60 \text{ nJ/bit}$, 簇首接收各发送节点感知结果的传输能耗 $E_{\text{Rx}} = 30 \text{ nJ/bit}$, 簇首节点综合判决所消耗的能力为 $E_{\text{DF}} = 60 \text{ nJ}$, 簇首节点的发送能量消耗 $E_{\text{elect}} = E_{\text{Tx}}$, 传输放大器增益 $\xi_{\text{amp}} = 40 \text{ pJ/bit}$. 假设分簇的 WSN 应用双门限能量监测的频谱感知理论, 并且簇首节点是在分簇内任意选择的. 在这种情况下, 当系统生命周期结束时, 节点剩余能量大约占节点初始能量的 42%, 这表明当簇中的一些节点能量耗尽时, 簇内还有其他一些节点依旧剩余许多能量, 这也从另一方面反映了系统中能量消耗是不均衡的. 采用改进的 LEACH 路由选择协议会延长系统的生命周期, 系统生命周期结束后, 节点剩余能量约占原来总能量的 18%.

此外, 实验还对监测数据上传的两种路由策略, 即数据服务型 (BOS) 和数据流使能型 (ERD) 进行了实验仿真. 实验中数据流由两部分组成, 分别是绑定数据组和突发数据组, 突发数据帧数要控制在总数据帧数的 30% 以内. 突发数据组是指网络中突发的、随机的、短期的一组数据帧. 因为突发数据组具有不稳定性, 所以在实验过程中, 当某个节点发送或者转发突发数据帧时, 到达该突发数据帧目的地址

的路由条目不一定在该节点的路由表中.

图 4 所示为两种路由方式路由效率的实验仿真结果. 可见, 当突发数据组数增大时, 由于 ERD 会对绑定数据组和突发数据组同时进行路由, 导致对突发数据组的敏感性降低, 从而又导致 ERD 路由的效率降低. 而 BOS 只需对绑定数据组进行路由发现, 因此其路由效率相对较高.

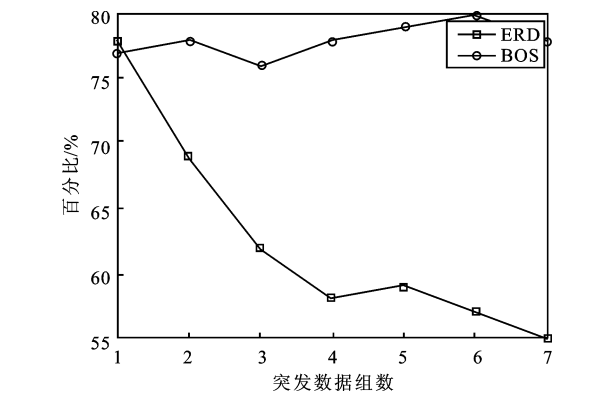


图 4 两种路由方式路由效率

图 5 展示了在两种不同路由方式下, 不同突发数据组数的平均转发次数的仿真结果. 其中, 平均转发次数是指一个数据帧从源节点到目的节点所经过的路由次数. 可见, 随着突发数据组数的增大, 采用 ERD 路由方式的平均转发次数较高; 而由于 BOS 路由方式对突发数据组采用树路由, 因此其平均转发次数较低.

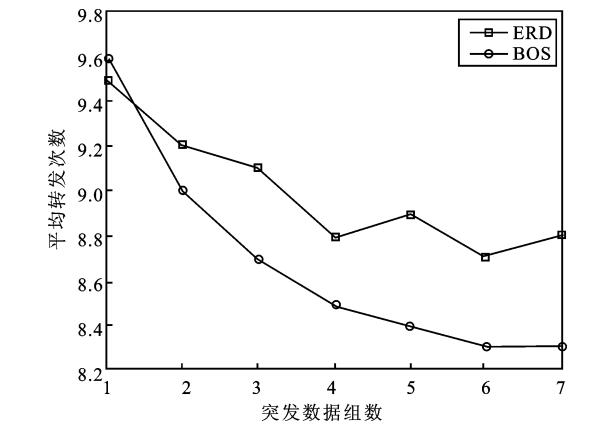


图 5 每数据帧两种路由方式平均转发次数

图 6 所示为两种路由方式总发送帧数的仿真结果. 分析图 6 中的两种路由方式总发送帧数的仿真结果可知, 当具有相同的网络负载时, BOS 路由方式比 ERD 路由方式大约节省了 9% 的总发送帧数, 从而降低了系统的能耗. 因此, BOS 路由方式对于以低功耗应用为主要目标的 IEEE802.15.4/ZigBee

技术规范而言,无疑是最好的选择。

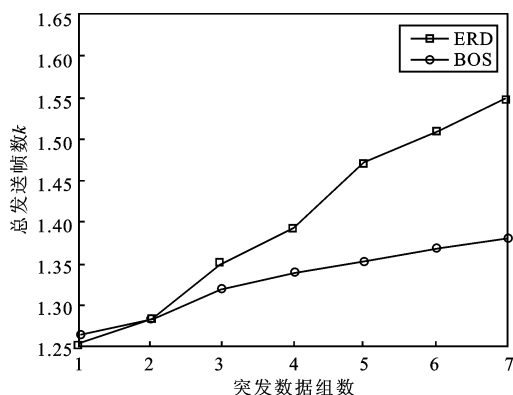


图6 两种路由方式总发送帧数

5 结束语

本文提出了一种面向频谱感知的 WSN 宽频带监测系统设计方案,该方案采用分频段协作感知和感知结果融合的处理机制,可以实现多频段频谱的同步和宽频带感知.同时,设计了频谱感知节点和汇聚节点,改进了 LEACH 分簇路由协议^[9]并进行了进行对应的能耗的分析.NS2 仿真实验结果表明,频谱感知无线传感器网络通过节点之间的自动组网和协同工作,可以对目标区域实施有效的宽频带频谱监测,在簇内选择合适的感知节点进行频谱感知并将感知结果发送给簇首进行判决,可以使得系统能耗达到均衡,并有效地延长系统的生命周期。

参考文献:

- [1] Glisic S G. 高级无线网络 4G 技术[M]. 陶小峰, 田

辉, 崔琪楣, 等译, 北京: 人民邮电出版社, 2013.

- [2] Yucek T, Arslan H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 11(1): 116-130.
- [3] Duan D L, Yang L Q, Principe J C. Cooperative diversity of spectrum sensing for cognitive radio systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(6): 3218-3227.
- [4] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey [J]. Computer networks, 2008, 52(12): 2292-2330.
- [5] 许毅. 无线传感网原理及方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [6] 张建照, 姚富强, 柳永祥, 等. 面向宽频段频谱感知的 WSN 架构及其分簇算法[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2013, 14(1): 12-18.
- [7] Chen Guo, Tao Peng, Xu Shaoyi. Cooperative spectrum sensing with cluster-based architecture in cognitive radio networks[C] // Proceedings of the 69th IEEE on Vehicular Technology Conference. Spain, Barcelona, 2009.
- [8] 李鑫, 张霞, 于宏毅. 一种电磁传感器网络的群规模约束分群算法[J]. 电路与系统学报, 2013, 18(2): 457-465.
- [9] 冉鹏. 网络路由协议性能研究与算法优化[D]. 上海: 同济大学, 2007.

作者简介:

王景琿 男, (1969-), 博士研究生, 高级工程师. 研究方向为电磁频谱监测、无线传感器网络、移动通信系统.

E-mail: wjinghui@sina.com.

(上接第 5 页)

- [8] McLevige W V, Sokolov V. Microwave switching with parallel-resonated GaAs FETS[J]. Electron Device Letters, 1980, 1(8): 156-158.
- [9] Hong-Yeh C, Ching-Yan C. A low loss high isolation DC-60 GHz SPDT traveling-wave switch with a body bias technique in 90 nm CMOS process[J]. Microwave and Wireless Components Letters, 2010, 20(2): 82-84.
- [10] Hsien-Chin C, Chia-Shih C, Yuan J, et al. Enhancement and depletion-mode InGaP/InGaAs pHEMTs on 6-inch GaAs substrate [C] // Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings. China, Suzhou: IEEE, 2005: 1-4.

作者简介:

刘宇轹 男, (1985-), 博士研究生. 研究方向为射频集成电路设计. E-mail: liuyuzheucas@126.com.

梁晓新 女, (1979-), 博士, 副研究员. 研究方向为射频与微波集成电路设计.

万晶 女, (1986-), 硕士, 助理研究员. 研究方向为射频与微波集成电路设计.

阎跃鹏 男, (1963-), 博士, 研究员. 研究方向为射频与微波集成电路与系统.