

# 一种基于多波束转换天线的 WSNs 跨层集成协议\*

王辛迪<sup>1</sup>, 韩江洪<sup>1,2</sup>, 石雷<sup>1,2</sup>

(1. 合肥工业大学 计算机与信息学院, 合肥 230009;

2. 安全关键工业测控技术教育部工程研究中心, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 针对无线传感器网络中(WSNs)随 Sink 节点位置移动带来的网络连通、能耗等问题,提出一种采用多波束转换天线的跨层集成协议(IMRPSB),协议充分利用了多波束转换天线优势,并将 MAC 层与路由层层间融合。利用移动 Sink 节点场景模型进行仿真,结果表明:IMRPSB 在保证网络连通性的同时,提高了网络的寿命,增强了网络性能。

**关键词:** 无线传感器网络; 协议融合; 多波束转换天线; 移动 Sink

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-9787(2015)12-0121-03

## A cross-layer integrated protocol for WSNs based on switched-multi-beam antennas\*

WANG Xin-di<sup>1</sup>, HAN Jiang-hong<sup>1,2</sup>, SHI Lei<sup>1,2</sup>

(1. School of Computer & Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Engineering Research Center of Safety Critical Industry Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In order to solve the problems such as connectivity and energy consumption brought by mobile Sink node in WSNs, a cross-layer integrated protocol MAC and routing protocol based on switched-multi-beam antennas (IMRPSB) is proposed, protocol takes full advantages of switched-multi-beam antennas and fuses MAC layer and routing layer. Mobile Sink node model is used to simulate the scene, and results show that IMRPSB ensures network connectivity and at the same time improves network lifetime and strengthen performance of network.

**Key words:** wireless sensor networks(WSNs); protocol fusion; switched-multi-beam antennas; mobile Sink

### 0 引言

随着天线技术的发展,针对智能天线的研究<sup>[1]</sup>逐渐兴起,多波束转换天线就是其中一类。它采用定向发射模式,拥有更大的通信半径<sup>[2]</sup>并减少系统干扰,提高频谱利用率。

现有研究中,文献[3]深度总结了 MAC 层和路由层协议研究现状,凸显了定向发射模式下的优势。Kulkarni S 在文献[4]中提出了将 MAC 和路由跨层融合的 AIMRP 协议,由 Sink 节点对场景模型层次性划分进而进行路由选择。文献[5]介绍在移动自组网下的经典路由算法和定向天线模型引起的路由问题。文献[6]通过区域划分的方式,利用智能天线作出有效的路由规划。

本文针对无线传感器网络(wireless sensor networks, WSNs)移动 Sink 节点情况下,基于多波束转换天线的跨层

集成协议(integrated MAC and routing protocol based on switched-multi-beam antennas, IMRPSB)。协议充分利用天线的优势,完善了前期链路层控制的邻居发现和帧结构优化,增加了拓扑控制<sup>[7,8]</sup>过程,适应移动 Sink 节点并制定相应的路由机制,达到减轻协议负载、提升了网络寿命的目的。

### 1 节点模型和场景模型

#### 1.1 多波束转换天线节点模型

多波束转换天线一般由多个窄波束天线构成,天线具有数目固定、方向可预指定的特点,每个窄波束天线由于张角较小,可以获得较大的增益。多波束转换天线根据算法选择某一特定方向,在天线阵列中只打开相应方向的一个窄波束天线并且关闭其他天线阵列扇区。

根据文献[8],节点射频能耗为  $E_{rf}$ , 电路能耗为  $E_{proc}$ , 发送能耗  $E_{tx}$ , 接收能耗  $E_{rx}$ , 且  $d_o$ ,  $d_d$  分别为全向发射天线

收稿日期: 2015-04-05

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61370088); 国家国际科技合作专项项目(2014DFB10060); 安徽省高等学校省级自然科学基金项目(KJ2011ZD01, KJ2012A224, KJ2012A233)

和定向发射天线在功率  $P_{act}$  下的通信距离。

定向发射天线发送  $n$  bit 的数据的能耗  $E_d$

$$E_d = E_{tx}(n, d_d) + E_{rx}(n) = 2nE_{proc} + nE_{rf}d_d^2 \quad (1)$$

全向发射天线发送数据  $n$  bit 的能耗  $E_o$  为

$$E_o = 2nE_{proc} + nE_{rf}d_d^2 g_m = 2nE_{proc} + \frac{2nE_{rf}d_d^2}{1 - \cos(\theta/2)} \quad (2)$$

可见全向天线发送能耗远大于定向天线。

## 1.2 场景模型

本文场景模型为矩形区域,无线节点随机均匀。移动 Sink 节点在场景中间区域环形移动。无线节点位置固定, Sink 节点可移动并认为能量不受限。

## 2 跨层融合协议设计

### 2.1 跨层融合协议

WSNs 协议设计不能完全采用传统网络协议模型,对适用性和效率会造成一定影响。

WSNs 应用需满足特定需求并重点考虑能耗,当需要有效减轻协议负载和减少协议栈时,协议的跨层融合将成为重要解决思路<sup>[8]</sup>。

### 2.2 信息采集阶段

传统链路层采用 IEEE 802.11 协议模型。定向天线的“盲点”状况会造成的连通性问题。由于节点能耗受限的情况,所以对 IEEE 802.11 进行优化,减轻协议负载。优化主要包括:

1) 节点间 RTS/CTS 等包流传递,采用阵元全向发射。对控制包流格式添加 DIC 控制字,检测包交互的天线扇区;添加身份标示符 ID,表示数据包源;添加节点类型控制字,区分不同类型节点。

2) 帧中添加 ID 号用于邻居信息采集,控制字 DIC 判断邻居节点方位,通过 CTS 包回复完成邻居的交互,以此收集节点邻居节点情况并判定节点类型。

### 2.3 网络拓扑控制阶段

RTS/CTS 控制帧进行网络信息采集工作。对本场景下的网络节点度进行研究<sup>[9]</sup>。

节点度是所有距离节点一跳范围内的邻居数目,是衡量网络结构好坏的重要标准。在保证连通度的情况下,对节点度进行优化,有利于提高整体网络寿命并增加网络容量。拓扑优化阶段如图 1 所示。

### 2.4 数据转发阶段

IMRPSB 以统一身份符作为地址标识。采用基于方向信息的路由机制,不再依赖地理位置信息。多波束转换天线可应对移动 Sink 节点情况,避免了网络拓扑变化导致的能量损失。

路由发送机制按节点类型做不同处理:

1) D 类型节点: 检查邻居表中是否含有 Sink,是,则发送;否则,调整功率和对丢弃位置位。

2) L 类型节点: 检查邻居表中是否含有 Sink,是,则发送;否则,检查  $M$  标记节点,是,则发送;否则,丢弃数据包

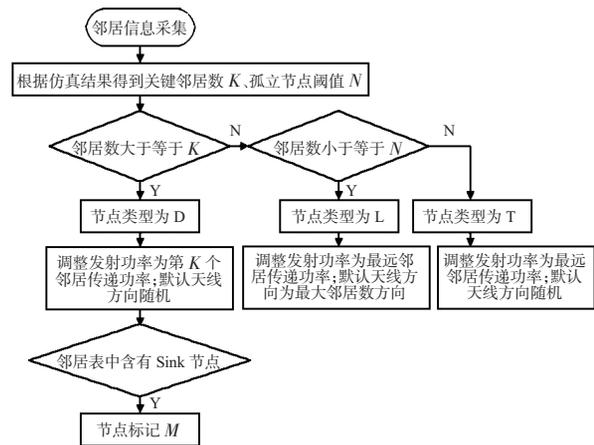


图 1 拓扑优化流程图

Fig 1 Flow chart of topological optimization

不进行转发。

3) T 类型节点: 检查邻居表中是否含有 Sink,是,则发送;否则,检查  $M$  标记节点,条件判断自身天线方向和数据包丢弃位,满足条件则丢弃数据包放弃转发。

## 3 算法仿真与性能分析

这里,对节点度进行仿真,均匀分布在  $800\text{ m} \times 800\text{ m}$  的区域。多波束转换天线方向  $\Phi \in \{\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4\}$ , 张角  $\theta = \pi/2$ , 路径损耗因子  $\alpha = 2$ , 采用定向发射/全向接收模式。最大覆盖距离  $160\text{ m}$ , 节点数  $n \in \{50, 100, 150, 200\}$ , 调整关键邻居数  $K \in [1, 20]$ , 对拓扑图连通率进行统计分析可以得到在  $n = 100$  时,当节点度  $K$  值达到 12,即连通率趋近于 1。

图 2 所示分别为拓扑结构的初始模型、邻居数优化模型、连通性控制模型。经数据统计, D 类型节点平均节点度下降 25%, 连接邻居数下降, 通信干扰概率降低; L 类型、T 类型节点节点度明显提升,保证了区域之间连通性。网络的平均通信距离下降 20%, 节点降低了发射功率,延长了寿命。

利用节点度  $K$  值,采用 OPNET 对 IMRPSB 协议进行仿真,节点进程模型包含 8 个模块,分别是天线模块 ANT\_N、接收模块 WLAN\_RXN、发送模块 WLAN\_TXN、链路层模块 WLAN\_MAC、路由层模块、数据统计模块 Collect、数据源模块 Source 和计时器模块 TS。

协议设计体现为链路层的 WLAN\_MAC 进程优化和路由层的进程设计。

IMRPSB 在 802.11 MAC 层进行一定的邻居信息采集和拓扑优化工作,所以对传统协议进行优化。主要介绍自定义的添加模块: 添加 FIND\_NEIGH 状态,开启定时器并产生优化后的 RTS/CTS 帧,采集邻居信息; DIS\_TYPE 状态通过接收 RTS 帧进行信息汇总,生成邻居表并判定自身节点类型; TC\_PRCS 状态用于根据类型调节发送方向和功率。

自设计路由进程 Routing 模块:

1) INIT 状态: 负责对路由模块的初始化进行参数设置;

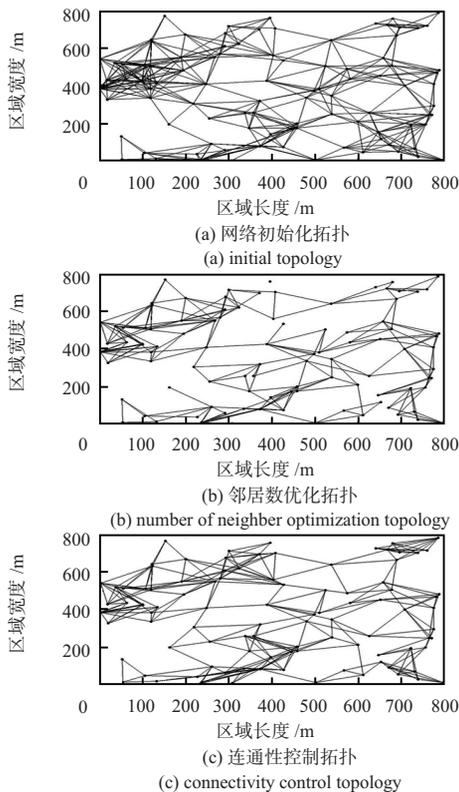


图 2 拓扑优化过程图

Fig 2 Topological optimization process

- 2) IDLE 状态: 属于进程的等待状态, 根据收到的不同中断进入不同的状态;
- 3) RECIV\_PACKET 状态: 接收由下层 MAC 传送上来的包流;
- 4) SEND\_PACKET 状态: 由 upper\_arrivl 中断或者 direct\_send 中断产生, 对收到数据包进行处理;
- 5) REC\_ACK 状态: 满足 ACK\_ARRIVL 时进入本状态, 表示成功收包;
- 6) TRANS\_FAIL 状态: 满足 NACK\_ARRIVL 时进入本状态, 重新发送数据包;
- 7) BROADCAST 状态: 由 REQUEST 中断进入本状态, Sink 节点重新位置广播。

这里对 IMRPSB、全向天线模型的 UDG-IMRPSB、采用传统方向性路由 DAPR<sup>[10]</sup> 进行平均节点能耗和分组交付率仿真比较。

随机采用源节点对 Sink 节点进行数据包传输。如图 3 所示, 小业务负载情况下, UDG-IMRPSB 利用其全向优势, 分组交付率接近 100%, 当网络业务负载变大, 节点间信道竞争导致碰撞概率增大, 协议的分组交付率均下滑, 定向发射天线在相同负载条件下可有效地提升分组交付率。

对网络中节点的平均能耗进行监测, 如图 4 所示, UDG-IMRPSB 协议在同样传输环境下发射能耗更高, DAPR 协议在 Sink 节点移动过程中产生的多次天线方向变更产生更多能耗, 而 IMRPSB 随着时间推移能耗损失趋于平稳。

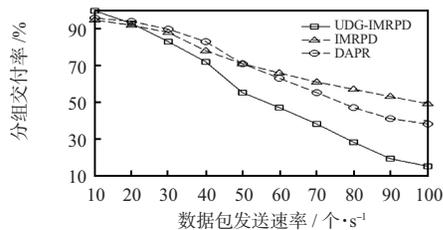


图 3 协议分组交付率

Fig 3 Protocol packet delivery ratio

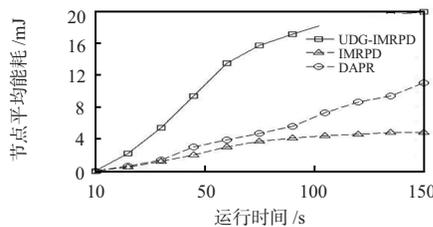


图 4 网络节点平均寿命

Fig 4 Average lifetime of network node

### 4 结论

IMRPSB 跨层融合了链路层与路由层, 采用多波束转换天线模型并适用可移动 Sink 节点的场景, 充分考虑 Sink 节点移动导致的问题。经过仿真得到, IMRPSB 在优化网络节点能耗, 提高分组交付率方面均有提高。但是协议也存在一定的缺陷, 在特殊情况的网络内区域真空导致 Sink 节点是否能接到传递还没有相关控制和证明, 有待进一步的研究。参考文献:

- [1] Rzymowski M, Kulas L. Design, realization and measurements of enhanced performance 2.4 GHz ESPAR antenna for localization in wireless sensor networks [C]// EUROCON 2013, 2013: 207 - 211.
- [2] 雷剑梅, 陈 旻. 智能天线技术及其发展 [J]. 电讯技术, 2006(1): 10 - 17.
- [3] Dai H N, Ng K W, Li M, et al. An overview of using directional antennas in wireless networks [J]. International Journal of Communication Systems 2013, 26(4): 413 - 448.
- [4] Kulkarni S, Iyer A, Rosenberg C. An address-light, integrated MAC and routing protocol for wireless sensor networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking 2006, 14(4): 793 - 806.
- [5] 王 维, 李 颖, 李洪生. 基于定向天线的移动自组网路由协议研究 [J]. 通信技术, 2010(7): 126 - 130.
- [6] Dai Y, Wu J. Boundary helps: Efficient routing protocol using directional antennas in cognitive radio networks [C]// Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems (MASS) 2013: 502 - 510.
- [7] Namboodiri V, Gao L, Janaswamy R. Power efficient topology control for wireless networks with switched beam directional antennas [C]// 2005 IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems, IEEE 2005: 596 - 604.
- [8] 卢先领, 孙亚民, 周 灵, 等. Ad Hoc 无线网络跨层设计综述 [J]. 计算机科学, 2007(10): 24 - 26, 32.

(下转第 130 页)

图4说明该算法能检测到早期低浓度烟雾,由图5可以看出:本文算法对树枝晃动和光照变化的影响具有较好的鲁棒性,并能够检测到远距离烟雾。

为验证本文算法的实时性,用本文算法和烟雾检测中常用的基于小波分析的多特征融合法(方法1)分别检测场景一下采集的视频中的烟雾,结果如表3所示。

表3 算法运行速度测试

Tab 3 Algorithm running speed test

检测方法	开始检测到烟雾的帧数(帧)	每帧处理时间(s)	对烟雾识别时间(ms)
本文算法	21	0.034	102
方法1	33	0.053	159

表3显示本文算法快速高效,满足变电站烟雾检测实时性要求。

## 6 结论

本文针对变电站环境提出一种基于颜色与运动特征的变电站实时烟雾检测算法。首先用改进的ViBe算法提取监控视频中的运动区域,再利用烟雾的颜色特征结合烟雾的面积增长特性和移动特性快速、准确地识别出烟雾区域。实验结果表明:本文算法能够检测到类似变电站场景中不同浓度的烟雾,对远距离烟雾也能够快速识别,满足变电站烟雾检测快速性、准确性要求,能够用于变电站智能视频烟雾检测中。

由于变电站环境特殊,不能在变电站进行实验,后续还需对实验环境进行改良,尽可能模拟变电站环境进行实验。

## 参考文献:

- [1] Gomez-Rodriguez F, Arrue B C, Ollero Robotics A. Smoke monitoring and measurement using image processing, application to forest fires [C]//Proceedings of Automatic Target Recognition XI-II SPIE, Orlando, FL, USA 2003: 404 - 411.
- [2] Celik T, Demirel H, Ozkaramanli H et al. Fire detection in video sequences using statistical color model [C]//International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing 2006: 213 - 216.

(上接第123页)

- [9] 李晓鸿, 张大方, 陈文斌, 等. 一种基于随机波束天线的自组网拓扑控制协议[J]. 计算机学报, 2011(7): 1342 - 1350.
- [10] Li Yang, Man Hong. A proactive direction based routing for directional Ad Hoc networks [J]. IEEE CCNC 2006 1(10): 416 - 420.

(上接第126页)

- [8] 侯贵升, 吴晓蓓, 黄成, 等. 无线传感器网络中一种基于标号的贪婪转发算法[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(9): 123 - 125, 128.
- [9] 杨海迎. 基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议设计与研究[J]. 现代计算机: 专业版, 2014(7): 3 - 6.

- [3] Chen T, Wu P, Chiou Y. An early fire-detection method based on image processing [C]//Proceeding of IEEE International Conference on Image Processing 2004: 1707 - 1710.
- [4] 陈天炎, 曾思通, 吴海彬. 基于YCbCr颜色空间的火焰图像分割方法[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(10): 62 - 64.
- [5] Töreyn B, Ugur, Yigithan Dedeoglu, Cetin A Enis. Wavelet-based real time smoke detection in video [C]//Proceeding of the 13th European Signal Processing Conference, Antalya, Turkey, 2005: 4 - 8.
- [6] Barnich O, Van Droogenbroeck M. ViBe: A powerful random technique to estimate the background in video sequences [C]//Proceedings of ICASSP 2009, Taipei: IEEE Computer Society, 2009: 945 - 948.
- [7] Barnich O, Van Droogenbroeck M. ViBe: An universal background subtraction algorithm for video sequences [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(6): 1709 - 1724.
- [8] 景美丽. 无人值守变电站中智能视频监控的技术研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2012.
- [9] Turgay Çelik, Hüseyin Özkaramanli, Hasan Demirel. Fire and smoke detection without sensors: Image processing-based approach [C]//15th European Signal Processing Conference, EU-SIPCO 2007, Poznan, Poland 2007: 3 - 7.
- [10] Torey in B U, Dedeoglu Y, Cetin A E. Contour-based smoke detection in video using wavelets [C]//14th European Signal Processing Conference, EUSIPCO 2006, Florence, Italy 2006: 123 - 128.
- [11] 刘晰雨. 基于视频特征的火灾火焰识别算法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.

## 作者简介:

宋伟(1980-)男,山东威海人,硕士,高级工程师,主要研究方向为输变电设备状态检修与故障诊断。

王玉平,通讯作者, E-mail: liangwyping@163.com.

## 作者简介:

王辛迪(1989-)男,山东淄博人,硕士研究生,主要研究方向为无线通信、物联网。

- [10] 徐跃州, 张欣, 张涛, 等. 基于贪婪-改进果蝇算法的无线传感器网络路由协议[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(5): 134 - 136, 139.

## 作者简介:

沈丹丹(1990-)女,江苏东台人,硕士研究生,主要从事渔船通信技术研究。