

基于 OPNET 的无线传感器网络节点跨层设计

周珏嘉, 林小竹, 慕春棣

(清华大学自动化系, 北京 100084)

摘要: 无线传感器网络是一类由大量位置相对固定的节点所组成的无线通信网络, 其节点能量、计算和通信能力都非常有限, 因此, 传统网络的层次设计和网络协议都难以应用到无线传感器网络中。为解决这些问题, 该文在传统网络层次设计思想的基础上, 提出了适用于无线传感器网络节点的跨层网络模型, 基于 OPNET 网络仿真工具实现了节点的跨层网络模型设计, 在此基础上实现了无线传感器网络中路由选择和数据汇聚等典型应用的仿真。结果表明, 新的跨层网络模型能够很好地描述节点各个层次的功能, 便于网络协议的综合设计和集中优化。

关键词: 无线传感器网络; 跨层设计; OPNET

Cross-layer Design in Wireless Sensor Networks Based on OPNET

ZHOU Jue-jia, LIN Xiao-zhu, MU Chun-di

(Automation Department, Tsinghua University, Beijing 100084)

【Abstract】 Wireless sensor networks (WSN) are a kind of wireless communication network made by a plenty of fixed nodes which have limited energy store and restricted computing and communication ability. Hence, traditional network layer design and network protocol aren't applicable in WSN. Based on the spirit of traditional network layer design, a new cross-layer network model is proposed. The new model is realized in OPNET in which typical applications of route selection and data collection are simulated. The result shows that new cross-layer model can well describe the function of each layer and make network protocol design more concentrative and synthetical.

【Key words】 wireless sensor networks; cross-layer design; OPNET

无线传感器网络(以下简称传感器网络)是一类由大量位置相对固定的节点所组成的无线通信网络^[1]。传感器网络通常用于环境探测和目标定位跟踪等应用, 应用中要求网络在特定时刻对特定区域进行探索, 并将感知数据以多跳方式传送到基站^[2]。

传感器网络节点通常由嵌入式硬件设备组成, 节点配备有中央处理器、数据存储模块、短距离无线通信模块和传感器模块等^[3]。由于传感器网络配置节点众多, 为减小网络部署成本, 每个节点的造价受到严格控制, 到目前为止, 传感器节点的能量供应、计算、存储以及无线通信能力都非常有限。另外, 传感器网络通常大量部署在环境恶劣的野外, 为其补充能量也非常困难。由于上述诸多因素, 传统网络的通信协议难以适用于传感器网络的应用中。为了在各种能力都非常受限的传感器节点上设计节省能耗和有利于数据汇聚的通信协议, 必须精简和优化网络协议栈的各层, 使层与层之间密切配合, 去除冗余操作, 以达到易于控制、减少能耗、节省数据缓存空间等目的。

1 传统网络的层次结构

传统网络模型主要有 OSI/RM 模型和 TCP/IP 模型 2 类, 其层次对应关系如图 1 所示。

OSI/RM(open systems interconnection / reference model)模型是国际标准化组织(ISO)提出的一套非常重要的网络互联模型标准。模型将网络划分为 7 层: 物理层, 数据链路层, 网络层, 传输层, 会话层, 表示层和应用层。

OSI/RM 模型作为一套全面的标准, 被众多协议参考, 但由于其过于细致和复杂, 许多协议都对其进行了优化裁减。

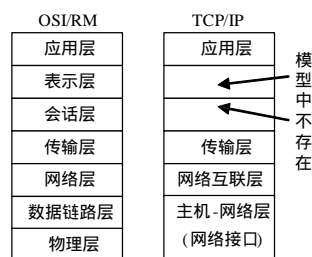


图 1 传统网络的 OSI/RM 模型和 TCP/IP 模型

TCP/IP 模型则从更实用的角度出发, 形成了具有高效率的 4 层体系结构, 即主机-网络层、网络互联层(IP 层)、传输层(TCP 层)和应用层。TCP/IP 模型吸取 OSI/RM 模型的长处, 合理地进行了精简和优化, 例如取消了表示层和会话层, 提供了极大的灵活性, 使其在互联网中得到了非常广泛的应用。

2 传感器网络的跨层网络模型设计

2.1 模型设计和描述

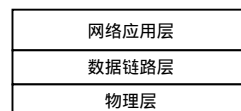


图 2 传感器网络节点跨层网络模型结构

传统网络模型的优化和精简对于传感器网络的节点模型

基金项目: 国际科技合作计划基金资助重点项目(2005DFA10920)

作者简介: 周珏嘉(1979 -), 男, 博士研究生, 主研方向: 无线传感器网络质量控制; 林小竹, 硕士研究生; 慕春棣, 教授、博士生导师

收稿日期: 2006-09-18 **E-mail:** zhoujj02@mails.tsinghua.edu.cn

设计有着巨大的参考价值。参照传统网络层次模型,结合传感器网络能量、计算资源、存储资源和带宽资源有限的特点,本文提出传感器网络的跨层网络模型结构,如图2所示。

其设计工作主要包括以下几个方面:

(1)删减功能冗余的层次——去除会话层、表示层

由于传感器网络中节点众多,无线信道资源相对紧张,数据多采用短数据包的形式发送,加之传感器网络数据汇聚量很大,因此一般应用都能够容忍一定程度的数据包丢失。基于长数据包的断断续续传机能的会话层发挥不了太多作用,由于传感器节点多采用同构的模式,互相之间不存在异种终端的交互问题,因此表示层的设立也是没有必要的。

(2)合并功能相关的层次——应用层、网络层、传输层合并为网络应用层

传感器网络是一类以数据为中心的网络,网络中节点的重要职能就是感知和传递数据,可以认为每个节点的主要应用任务就是数据的处理、接收和发送,而这正是网络层描述的职能。因此,传感器节点的应用层和网络层是密不可分的。传感器节点计算和数据缓冲能力有限,只能进行简单的数据分流/合流和质量控制算法,而这些算法也必须和网络层的工作密切配合完成,因此,传输层也应该与网络层和应用层融合,以达到集中协调、便于控制的目的。

(3)对保留层次的优化——保留并优化数据链路层和物理层

传感器网络采用无线通信方式,每个节点的通信距离通常在几十米至数百米范围内,由于能耗限制,节点大多数时刻需要使用尽可能小的功率与邻居节点传输数据,但布撒具有不均匀性,节点距自己邻居的距离可能各不相同,这就需要节点物理层具备对发射功率可调的能力。另外,由于网络中节点数量众多,信道竞争非常激烈,传统的数据链路层协议可能导致过快的能耗或是不必要的的数据碰撞,因此,需要针对应用设计适合在传感器网络中使用的数据链路层协议。

2.2 OPNET 下的网络模型设计

OPNET是通信网络领域权威的仿真工具^[3],其层次化的建模和基于有限状态机的模型描述,更符合国际标准化组织对网络模型的表达方式。OPNET采用离散事件驱动的仿真机制,并发的事件被模拟为密集的离散事件处理。仿真中的各个模块之间通过事件中断方式传递事件信息。

根据传感器网络的特点,以及前文所述的跨层模型特征,本文基于 OPNET 设计的节点网络模型如图3所示。

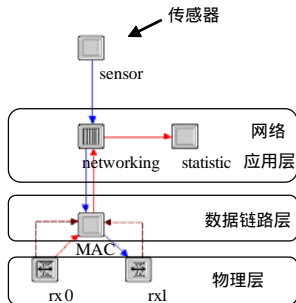


图3 OPNET 下的传感器网络节点跨层模型

其中最底层为物理层,包括收信机和发信机,设计为单双工无线信号收发模块;物理层的上层为数据链路层,这里参考了 802.11 数据链路层协议,并可选择性地加入随机退避机制,以在需要的时候减少无线信号的碰撞;最上层为网络应用层,该层包含了主要的网络应用层协议模块(networking)

以及缓冲队列,另外,为了在仿真过程中统计仿真数据,该层还附带了统计中心模块(statistic)负责汇聚实验数据,并做统计计算。节点的数据采集机制在传感器模块(sensor)中实现,该模块模拟产生各类时间分布的感知数据。

这里详细描述功能相对复杂的网络应用层。根据传感器节点典型应用的需要,在网络初始化以后,将节点分为汇聚节点、传输节点和传感节点3类,网络应用层针对不同类型的节点设计不同的策略,整个网络应用层的有限状态机设计如图4所示。

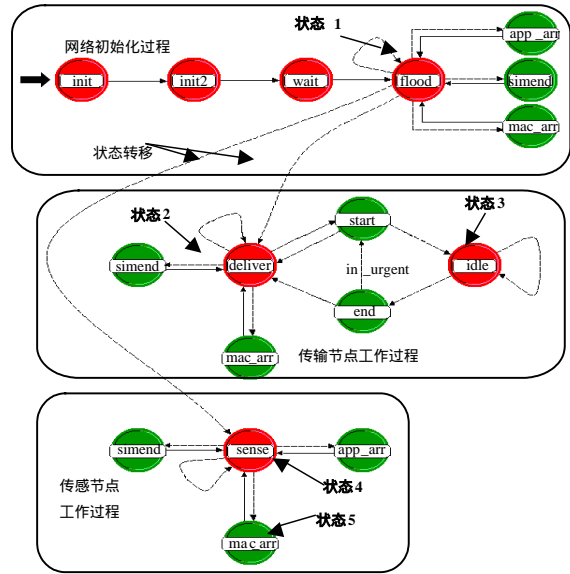


图4 网络应用层有限状态机的转移

图4中,在节点布撒后,所有节点都进入网络初始化过程,此过程中,汇聚节点将广播路由建立所需的控制数据包,并进行网络洪泛等路由建立过程,使网络中的节点进行路由信息的初始化。例如,为了建立最小跳数路由,可以先从汇聚节点开始全网洪泛(图4中状态1),洪泛包中携带发送节点的ID及发送节点到汇聚节点的跳数(汇聚节点到自身的跳数定义为0),接收到数据包的节点读取包中的发送节点ID域,并将其添加到自己的邻居列表中,然后再从包中读取发送节点到汇聚节点的跳数域,加1以后作为自己到汇聚节点的跳数并记录下来,最后将自己的ID和自己到汇聚节点的跳数装配为一个新的数据包向下洪泛。最终,所有节点都将获知自己的邻居节点列表、所有邻居节点到汇聚节点的最小跳数以及自己到汇聚节点的最小跳数(最小跳数策略中,节点将以邻居节点中距汇聚节点跳数的最小值作为下一跳的选择,直至汇聚节点)。如果在网络初始化过程中稍带其他指标数据,例如能量信息、地理位置信息等,还可以构造基于能耗或基于地理信息的路由数据。

初始化过程结束后,节点产生时间中断,根据各自的初始配置,传输节点将进入传输节点工作过程,传感节点则进入传感节点工作过程(见图4中的状态转移动作),汇聚节点则停留在初始化的末端状态(状态1)进行数据监听和收集。

在传输节点工作过程中,节点接收数据链路层传递的数据包(状态2),并将包缓存到包缓冲队列中,然后再根据实际协议的策略进行转发(状态3)。转发策略首先要考虑路由算法,即数据包发送的下一跳节点,根据不同应用,转发策略也会有所不同。另外,转发策略还需要考虑转发的时机,例如对于实时数据包,转发应该尽可能地及时,对于非实时数

据包,可以适当缓冲以后转发,以减轻网络负担,为实时数据的发送创造好的条件。

传感节点工作过程中,节点采集传感器送达的数据(状态4),并向邻居节点转发(状态5),转发策略可以是缓冲以后转发,也可以不缓冲直接转发。

从以上设计过程可以看出,将一些模型层次合并以后,无论是路由算法设计还是数据处理算法设计都变得更加简练,算法之间没有多余的数据缓冲量,协议之间可以紧密结合,使各种控制都变得高效易行。

3 模型功能验证

3.1 验证方法设计

为验证跨层模型的有效性,本文设计了基于队列缓冲的最小跳数数据汇聚实验。实验场景及节点配置如表1所示。

表1 实验场景和节点的主要配置

场景范围	500m × 500m
节点数量	40个
节点通信范围	100m
数据链路协议	IEEE 802.11
节点缓冲区大小	容纳5个数据包
节点持续侦听时间	2s
路由建立时间	100s
仿真模拟时间	1h

节点的最小跳数路由算法如2.2节所述,在路由信息建立以后(100s以后),所有节点按照预先设定划分为传感节点、传输节点和汇聚节点,如图5所示。

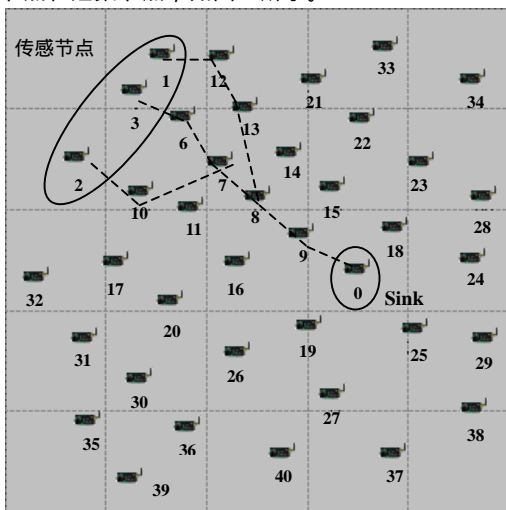


图5 OPNET下的实验场景

在此之后,传感节点开始产生感知数据。传输节点接收到传感节点数据包以后将包缓存到包缓冲队列中,并在之后的短暂时间(持续侦听时间)内继续监听是否还有数据到达,以提高多个数据包连续到达时的数据抓取效率。当短时间内没有传感数据到达时,传输节点开始按照先到先服务的原则进行包转发。当数据流量较大时,节点可能会在短时间内收到多个数据包,如果节点的包缓冲数量超过某个门限值(服务高限),节点就进入“紧急状态”(in_urgent),在此状态下,节点持续服务缓冲队列而不接收新的数据包,直到队列缓冲的包数量低于另一个门限值(存储低限),再进入正常的监听发送状态。最终,可以通过网络传输数据的情况,以及数据包到达汇聚节点的路由来验证跨层模型的有效性。

3.2 仿真结果

如图5所示,场景中有3个传感节点1,2和3号节点,设置感知数据的发生时刻为100s,并且感知数据为每10s间

隔到达的数据包;0号节点为汇聚节点;其他节点为传输节点,传输节点的服务高限为4个数据包,存储低限为3个数据包。为了体现数据包的路由状况,所有流向汇聚节点的数据包都将包含途中经过的节点ID,通过汇聚节点在仿真结束以后的报告可以体现出到达数据包的路由情况,其中的一个片断如表2所示。

表2 到达包的路由情况

包ID	包路由(途经节点ID从左到右)
...	...
55	3 6 7 8 9 0
56	2 10 7 8 9 0
57	3 6 7 8 9 0
58	2 10 7 8 9 0
59	1 12 13 8 9 0
60	3 6 7 8 9 0
61	1 12 13 8 9 0
...	...

可以看出,3个传感节点的汇聚路由如图5中的虚线所示,数据包按照最小跳数的准则选择下一跳节点,并最终汇聚到汇聚节点。

降低传输节点的服务高限为3个数据包,存储低限为2个数据包,其他参数不变,在OPNET中得到节点的平均缓存队列长度统计(以节点8为例)及数据包端到端延迟曲线对比分别如图6、图7所示。由图6可知,缓冲高限和低限较高时更多的数据包被缓存到节点中,因此,节点的平均包缓存队列长度明显长于经过高限和低限较低时的队列长度。

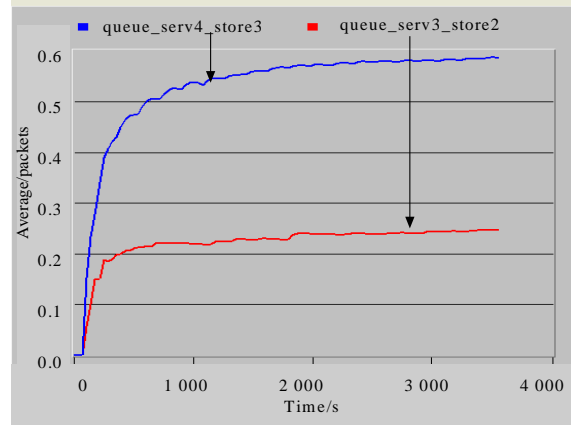


图6 节点8的平均缓存队列长度

从图7中可以看出,缓冲高限和低限较高时,节点倾向于缓存数据包,并不急于发送,而缓冲较低时,节点倾向于更快地发送出数据包,因此,缓冲高的情况下,数据包在节点内的停留时间更长,到达时的端到端延迟更大。实验中节点在接收到数据包之后的持续侦听时间也在整体上增大了数据包的端到端延迟。

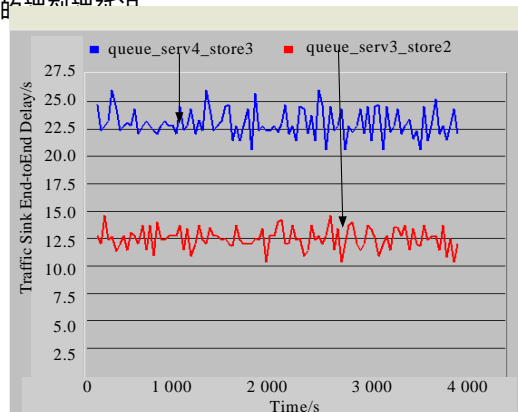


图7 数据包的端到端延迟

图 8 显示了汇聚节点的平均吞吐量随时间的变化曲线。

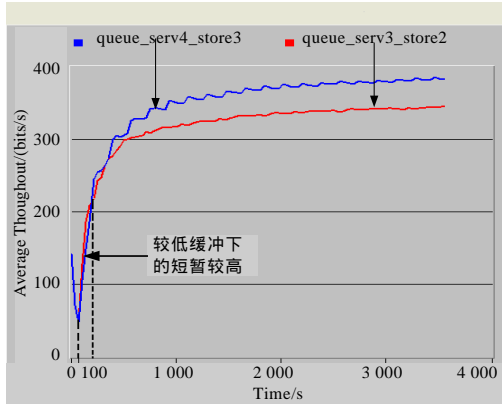


图 8 汇聚节点的平均吞吐量

在开始的路由建立时间内(图 8 中 100s 之前), 汇聚节点只有自己的邻居节点反馈回路由建立信息, 因此吞吐量较小; 随后, 网络进入数据汇聚阶段(图 8 中 100s 之后), 汇聚节点的数据吞吐量逐渐增大。与缓冲高时相比, 缓冲较低时的节点更快地将数据包发送出去, 在网络相对空闲的初期, 数据包很快到达, 因此, 数据吞吐量呈现短暂的较高阶段(图 8 中虚线范围内的阶段); 但随着数据量的增大, 低缓冲情况下快速发送数据包令网络变得更加繁忙而拥塞, 进而导致汇聚节点的数据吞吐量下降。而较高缓冲的情况更倾向于适当地缓存数据包, 以避免大批量数据同时到达时造成的网络繁忙, 因此, 汇聚节点的数据吞吐量在后期平稳增大, 最终高于缓冲较小的情况。

从整个仿真过程可以看出, 传感器网络的跨层模型具备

了便于设计、统计和控制的良好特性。

4 结论

本文在对传统网络模型进行总体分析的基础上, 提出了无线传感器网络的跨层模型设计思想, 并根据无线传感器网络能量有限、计算和存储资源有限等特性, 以传统网络模型作为参考, 设计了适用于无线传感器网络的跨层网络模型。

为了验证跨层网络模型的有效性和实用性, 本文利用 OPNET 网络仿真工具设计了基于队列缓冲的最小跳数路由实验, 对模型进行验证。结果表明, 在跨层网络模型基础上, 用户能够高效便捷地设计多种功能的路由算法, 算法能够针对路由、数据处理等各个层面的问题, 更好地进行综合设计和集中控制。

参考文献

- 1 孙利民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- 2 Chen Dazhi, Varshney P K. QoS Support in Wireless Sensor Networks: A Survey[C]//Proc. of International Conference on Wireless Networks. 2004.
- 3 王文博, 张金文. OPNET Modeler 与网络仿真[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- 4 慕春棣. 嵌入式系统的构建[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004-08.
- 5 Zhao Feng. Wireless Sensor Networks: A New Computing Platform for Tomorrow's Internet[C]//Proc. of the 6th CAS Symp. on Emerging Technologies: Mobile and Wireless Comm.. 2004.
- 6 Papadimitratos P, Mishra A. A Cross-layer Design Approach to Enhance 802.15.4[C]//Proc. of IEEE Military Communications Conference. 2005.

(上接第 129 页)

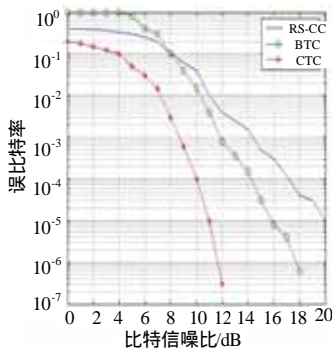


图 7 无线局域网 OFDM 工作模式的不同差错控制方案的性能

编码增益方面: 在 $1e^{-3}$ 处, 相对于默认差错控制方案 RS-CC, BTC 方案得到了 2.2dB 的增益, 而 CTC 方案有近 6dB 的增益; 在 $1e^{-5}$ 处 BTC 得到了 4.2dB 的方案增益, 而 CTC 高达 9dB 的方案增益, 这是非常可观的编码性能。

4 结论

大量的仿真显示, 单载波系统模式下采用级联码方式的差错控制方案, 对高码率的传输模式, 性能的改变是更加可观的。这也正是在离基站较远的地方采用高码率传输模式获得高速率的重要保障。而多载波 OFDM 系统模式下, 相对于 BTC, CTC 方案由于级联了卷积码, 使得该方案在低信噪比下的性能得到较大的改善, 使其整体变得非常优越。

综上所述, 无线城域网的前向差错控制方案选择不同的级联码型(调制方式、匹配码率、映射图案), 可以获得不同的编码效率和编码增益。而实际应用也要求基带系统能根据信道条件的不同选择合适的编码方案, 这样才能获得最高的传输可靠性, 因此本文的性能分析在实际应用中具有较好的参考价值。

参考文献

- 1 IEEE Std 802.16TM-2004 IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems[S]. 2004.
- 2 IEEE Std 802.16a-2003 IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Part16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems-Amendment 2: Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layer Specifications for 2-11GHz[S]. 2003.
- 3 王新梅, 肖国镇. 纠错码——原理与方法[M]. 2 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.
- 4 袁东风, 张立军, 高春艳. 一种在 Rayleigh 信道中计算级联码性能的理论方法[J]. 通信学报, 2000, 21(10): 86-89.
- 5 Proakis J G. 数字通信[M]. 3 版. 张力军, 张宗橙, 郑宝玉, 等. 译. 北京: 电子工业出版社, 2001: 443-459.
- 6 尹俊勋, 刘婷婷, 姚志强. 基于 IEEE 802.16a 的 TCM 译码方案[J]. 华南理工大学学报, 2005, 33(6): 9-13.